

Ю. С. Кобяков, Н. Н. Кудрявцев,
В. И. Тимошенко



БИБЛИОТЕКА
ИНЖЕНЕРА -
ГИДРОАКУСТИКА

Ю. С. Кобяков
Н. Н. Кудрявцев
В. И. Тимошенко

КОНСТРУИРОВАНИЕ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ РЫБОПОИСКОВОЙ АППАРАТУРЫ

СУДОСТРОЕНИЕ

Ю. С. Кобяков, Н. Н. Кудрявцев, В. И. Тимошенко

КОНСТРУИРОВАНИЕ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ РЫБОПОИСКОВОЙ АППАРАТУРЫ



Ленинград
«Судостроение»
1986

ББК 32.875
К55
УДК 639.2.081.7 : 681.883

СЕРИЯ «БИБЛИОТЕКА ИНЖЕНЕРА-ГИДРОАКУСТИКА»

Редакционная коллегия: А. В. Алексеев, В. И. Бабий, А. П. Евтюков,
В. И. Ильичев, А. Е. Колесников, Е. А. Корепин, А. П. Ляликов,
В. В. Ольшевский, Л. В. Орлов, А. Л. Простаков, Г. М. Свердлин, А. Д. Старков,
Ю. Ф. Тарасюк (ответственный редактор), В. И. Тимошенко

Рецензент — канд. техн. наук Ю. Ф. Тарасюк

Кобяков Ю. С., Кудрявцев Н. Н., Тимошенко В. И.

К55 Конструирование гидроакустической рыбопоисковой аппаратуры.— Л.: Судостроение, 1986.— 272 с., ил. (Библиотека инженера-гидроакустика).

Рассмотрены основные вопросы теории, инженерного расчета, проектирования и конструирования гидроакустической аппаратуры применительно к задачам рыбного промысла. Значительное внимание уделено выбору, обоснованию и расчету тактических и технических параметров, а также особенностям создания основных конструктивных элементов аппаратуры (трактов излучения, приема и обработки гидроакустических сигналов, индикаторных устройств, систем стабилизации и т. п.). Отмечены тенденции развития аппаратуры с учетом микроиниатюризации, применения микропроцессоров, параметрических антенн и др.

Книга предназначена для инженеров-гидроакустиков, занимающихся разработкой, испытаниями и эксплуатацией гидроакустической аппаратуры, а также для студентов соответствующих специальностей.

К 3605030000—055
048(01)—86—50—86

32.875

© Издательство «Судостроение», 1986 г.

СЕРИЯ «БИБЛИОТЕКА ИНЖЕНЕРА-ГИДРОАКУСТИКА»

**Юрий Семенович Кобяков,
Николай Николаевич Кудрявцев,
Владимир Иванович Тимошенко**

**КОНСТРУИРОВАНИЕ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ РЫБОПОИСКОВОЙ
АППАРАТУРЫ**

Заведующий редакцией *А. Д. Старков*

Редактор *Э. В. Зубкова*

Художественный редактор *О. П. Андреев*

Технические редакторы *А. И. Казаков, Г. Г. Федорова*

Корректоры *Т. С. Александрова, И. М. Савенок*

ИБ № 1027

Сдано в набор 10.03.86. Подписано в печать 09.07.86. М-35470. Формат 60×90¹/₁₆. Бумага типографская № 2. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 17,0. Усл. кр.-отт. 17,0. Уч.-изд. л. 19,2. Изд. № 3965—84. Тираж 2400 экз. Заказ № 263. Цена 1 р. 30 к.

Издательство «Судостроение», 191065, Ленинград, ул. Гоголя, 8.

Ленинградская типография № 8 ордена Трудового Красного Знамени Ленинградского объединения «Техническая книга» им. Евгении Соколовой Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 190000, Ленинград, Прачечный переулок, 6.

В настоящее время практически нет ни одного проекта судна, на котором не предусматривалась бы установка гидроакустической рыбопоисковой аппаратуры (РПА). Функции гидроакустической РПА в зависимости от задач промысла постоянно усложняются. Кроме основного ее назначения — поиска рыбы, появилась необходимость видовой и количественной классификации рыб, оценки рыбных запасов (в том числе во внутренних водоемах), автоматизации процесса поиска и сопровождения объектов лова, контроля состояния и заполнения рыбой орудий лова, повышения достоверности информации об окружающей обстановке промысла с выдачей рекомендаций по управлению судном в процессе поиска и облова промысловых объектов. Обеспечение высокой эффективности современных средств поиска объектов морского промысла является весьма актуальной проблемой, решение которой осуществляется как в сфере производства — путем создания средств, наилучшим образом способных выполнять поставленные перед ними задачи, так и в сфере эксплуатации — путем разработки и реализации оптимальных методов использования этих средств. Особенно возросла роль РПА в связи с введением двухсотмильных национальных экономических рыболовных зон и заметным обеднением биологических ресурсов Мирового океана. При современном состоянии сырьевой базы и расширении районов и глубин рыбного промысла для удовлетворения требований промышленного рыболовства и успешного ведения промысла в Мировом океане, а также повышения эффективности рыбопромыслового флота необходимо широкое внедрение на судах новейшей РПА, базирующейся на последних достижениях гидроакустики и электроники.

Наша страна располагает мощным рыбопромысловым флотом. В нем представлены суда различных классов, которые оснащаются отечественной серийной РПА. Зарубежные фирмы, производящие РПА, ориентируются на оснащение в основном мелких и средних рыбопромысловых судов. В зависимости от размеров и назначения рыбопромыслового судна к РПА предъявляются различные требования, которые определяются, с одной стороны, возможностями размещения аппаратуры, с другой — возможностями судна работать в тех или иных районах промысла. Советским специалистам приходится создавать РПА для различных классов

судов вплоть до крупных гидроакустических рыбопоисковых и навигационно-промысловых комплексов со сложными задачами взаимного сопряжения аппаратуры разных классов.

Гидроакустическая РПА постоянно совершенствуется и усложняется в зависимости от типа решаемых задач. По конструктивным признакам и используемой элементной базе РПА иногда классифицируют по поколениям. В настоящее время на смену отечественной аппаратуре третьего поколения на полупроводниковых приборах начинает приходить аппаратура четвертого поколения, где используются микроэлектронные приборы, элементы цифровой техники, микропроцессоры и микроЭВМ, новые сканирующие устройства и излучающие тракты, в том числе параметрические, цветные индикаторы и дисплеи и др. Все это рассматривается в предлагаемой книге.

Чтобы отразить преобладание методов конструирования РПА разных поколений, авторы старались дать методологию и показать общие принципы конструирования, иллюстрируя их примерами конструкторских решений и расчетов конкретных типов отечественной и зарубежной РПА.

В имеющейся технической литературе, как правило, малодоступной для широкого круга специалистов, достаточно подробно рассматривается состояние зарубежных разработок РПА или вопросы расчета и конструирования отдельных ее частей: антенн, преобразователей, систем обработки гидроакустической информации и др.

В нашей стране накоплен большой опыт конструирования РПА всех классов и назначений. Авторы предлагаемой книги попытались обобщить имеющийся материал по проектированию и конструированию рыбопоисковой гидроакустической аппаратуры и на конкретных примерах показать взаимосвязь основных функциональных элементов РПА, охарактеризовать пути разработки отдельных узлов и определить тенденции развития аппаратуры.

Книга предназначена для инженеров, занимающихся разработкой, испытаниями и эксплуатацией гидроакустической аппаратуры, для проектировщиков судовой радиоэлектронной аппаратуры, а также для студентов соответствующих специальностей.

По просьбе авторов гл. 12 написана инженером П. П. Заярным.

Авторы считают своим долгом выразить благодарность В. П. Иванченко за рекомендации по подготовке книги, которые способствовали улучшению ее содержания, а также О. Е. Кругликовой, В. А. Поярковой и Л. Л. Радомской за помощь в оформлении рукописи.

Отзывы и замечания по содержанию книги будут приняты авторами с благодарностью. Просим направлять их по адресу: 191065, г. Ленинград, ул. Гоголя, д. 8.

Часть I

ВЫБОР, ОБОСНОВАНИЕ И РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ РПА

Глава 1

РАЗВИТИЕ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ РЫБОПОИСКОВОЙ АППАРАТУРЫ В СССР И ЗА РУБЕЖОМ

§ 1.1. Краткие исторические сведения о внедрении гидроакустической аппаратуры на рыбном промысле

Создание гидроакустической рыбопоисковой аппаратуры является одним из самых молодых и бурно развивающихся направлений морского приборостроения.

Возможность обнаружения подводных объектов с помощью звуковых волн была отмечена давно. Еще в 1490 г. Леонардо да Винчи фактически описал схему шумопеленгаторного гидроакустического устройства: «Если вы остановите свой корабль и опустите один конец длинной трубки в воду, а другой ее конец приложите к уху, вы услышите корабли на большом расстоянии от вас» [99].

Но только в начале XX века некоторые суда стали вооружаться первой примитивной гидроакустической аппаратурой — колоколами — для поддержания связи между собой. В 1912 г. Л. Ф. Ричардсон подал в Британское патентное управление заявку на изобретение способа определения расстояния с помощью звукового эхосигнала, распространяющегося в воде. В 1916 г. во Франции русский инженер-электрик Константин Шиловский в содружестве с физиком Полем Ланжевром в экспериментах с конденсаторными резонаторами и угольными микрофонами смогли получить эхосигналы от дна и стальной плиты на расстоянии 200 м, т.е. практически впервые создали новый класс гидроакустической аппаратуры — прообраз гидролокатора.

Первоначально активная гидролокация использовалась в основном для измерения глубин под килем судна. В 1925 г. в США и Великобритании появились первые эхолоты, а в 1938 г. в США началось производство гидролокаторов.

В 20-е гг. впервые была высказана мысль о возможности обнаружения рыбы акустическими методами. На заседании биологического и океанографического общества в Париже в 1924 г. профессор Портье в докладе «Применение ультразвуковых волн для биологических и океанографических исследований» высказал предположение о перспективности определения точной глубины плотных стай рыб посредством отражения ультразвуковых волн. Идея использования гидроакустических средств для обнаружения

косяков рыб подтверждались сообщениями моряков о необычных показаниях навигационных эхолотов, которые значительно отличались от значений, обозначенных на карте. Как оказалось, эхолоты в данных случаях фиксировали глубину над рыбным косяком.

Первая практическая попытка рыбоэхолотирования принадлежит доктору Кимура (Япония), применившему в 1929 г. для обнаружения рыбы ультразвуковые колебания. В 1933 г. шкиперу Болсу (Великобритания), который вел наблюдения за рыбными стаями по показаниям эхолота Magcon-424, удалось сопоставить показания визуального индикатора с полученными уловами. Капитан Бокн на судне «Сигнал» в 1934 г. зарегистрировал четкие записи косяков кильки на ленте регистратора эхолота Hughes-Admiral и при этом получил хорошие уловы. В 1935 г. капитан Оскар Зунд (Норвегия) на исследовательском судне «Йоганн Хьюрт» осуществил поиск трески при помощи эхолота. В 1937 г. Рунстрем (Норвегия) акустическим методом исследовал распределение скоплений сельди у Норвежского побережья. Гидроакустические навигационные приборы использовали для рыболокации и в нашей стране. Так, в 1938 г. сотрудники ПИНРО успешно применили английский эхолот MS-XII для поиска сельди и нерестовых концентраций трески на экспедиционном судне «Персей».

Вторая мировая война прервала начавшиеся интенсивные исследования по рыболокации. Болс результаты своих наблюдений опубликовал лишь в 1946 г., но в зарубежной литературе именно за ним утвердилось слава пионера в области акустических методов поиска рыбных скоплений.

После второй мировой войны возобновились исследования в этой области. Но все они проводились с помощью навигационных эхолотов. Большое различие между интенсивностями эхосигналов (в десятки раз), отраженных от грунта, на величины которых были настроены приемные антенны эхолотов, и от рыбных скоплений, не давали реальной картины. Постепенно пришли к выводу о необходимости разработки специальной гидроакустической рыбопоисковой аппаратуры.

Практически только в 50-х гг. началось целевое и регулярное использование гидроакустических средств для поиска рыбных скоплений. К этому же периоду следует отнести появление отдельной отрасли гидроакустической техники — рыбопоисковой аппаратуры (РПА).

В начальной стадии своего развития гидроакустическая аппаратура для промышленного рыболовства использовалась в основном для поиска и обнаружения объектов промысла, поэтому и получила название рыбопоисковой. В дальнейшем в связи с повышением требований, усложнением задач и расширением круга вопросов, решаемых гидроакустической техникой в промысловом рыболовстве, на первый план стали выдвигаться измерительные функции указанной аппаратуры. В настоящее время помимо качественной информации о наличии рыбы и других объектов про-

мысла требуется быстро определять множество характеристик этих объектов и выдавать рекомендации по оптимальному управлению судном при их облове.

Наиболее развитые рыбодобывающие страны — СССР, Япония, Норвегия, ФРГ, Великобритания и США, которые за сравнительно короткий для техники 30-летний срок создали мощную базу по разработке и производству РПА. В последнее время к ним присоединились также Канада, Голландия, Франция, ГДР, Болгария и другие страны.

Анализ добычи рыбы разными странами показывает, что увеличение уловов находится в прямой зависимости от количества и качества гидроакустической РПА, находящейся на судах рыбного флота.

§ 1.2. Тенденции развития зарубежного рыболокационного приборостроения

В Японии, Норвегии, ФРГ, Великобритании и США в 50-х гг. возникли специализированные фирмы, являющиеся в настоящее время ведущими в мире. Всего за рубежом таких фирм насчитывается более 20. Рассмотрим кратко некоторые тенденции развития РПА ведущих фирм мира.

Япония. Фирма *«Furuno Electric Co, Ltd (торговая марка «Furuno»)»* была организована из небольшой исследовательской лаборатории, изучавшей распространение ультразвука в воде. В декабре 1948 г. она выпустила первый эхолот, а сейчас является ведущей фирмой по производству РПА в Японии.

Большое внимание фирма уделяет производству навигационных и рыбопоисковых эхолотов и гидролокаторов для малых и средних судов. Фирма выпускает до 10 000 эхолотов в год, что составляет 55—60 % всех эхолотов, выпускаемых в стране, 80 % мелких и средних японских судов оснащены приборами этой фирмы. Большая часть этой продукции только собирается на ее заводах из деталей, изготавливаемых другими фирмами.

Фирма разработала и освоила выпуск приборов контроля параметров орудий лова с гидроакустическим каналом связи и в настоящее время удерживает первенство в производстве этих приборов как по количеству моделей, так и по числу выпускаемых комплектов. Фирмой разработаны и выпускаются сканирующие гидролокаторы с цилиндрическими акустическими системами и с применением цифровой техники серий FSS, CS и CSV, эхолоты серий FCV, FWGT, ES, FQ, приборы контроля параметров орудий лова серии FNR. Несмотря на столь большое разнообразие выпускаемых фирмой приборов, их конструктивные отличия незначительны. В последнее время фирмой разработан ряд цветных электронных индикаторов телевизионного типа, резко расширивших технические возможности РПА.

Особое внимание заслуживает разработанная и выпускаемая фирмой телеметрическая система Telesounder (TS-32-Mark 2),

которая способствует оптимальному координированию действий судов при групповом поиске и лове рыбы. Это достигается путем дистанционной выборочной регистрации показаний РПА отдельных (подчиненных) судов на едином регистраторе главного (флагманского) судна, что позволяет оператору принять то или иное практическое решение, определяющее их взаимное действие.

Фирма «Fugino» известна короткими сроками разработки аппаратуры, что объясняется широким внедрением машинного проектирования. Большой объем выпускаемой продукции достигнут благодаря высокой роботизации производства. Фирма сотрудничает (или имеет свои филиалы) со многими странами мира (США, Великобритания и др.).

Продукция фирмы высоко котируется на международном рынке.

Фирма «Koden Electronics Co, Ltd» (торговая марка «Koden»). С 1956 г. в ассортимент радиоэлектронной аппаратуры фирмы входит разработка и выпуск РПА. Фирма специализируется на выпуске эхолотов, гидролокаторов и приборов контроля параметров орудий лова. Все технические решения фирмы, как правило, патентуются в Японии и за рубежом. Конструкции приборов от модели к модели мало изменяются, а электрические схемы претерпевают значительные изменения. Фирма выпускает следующую продукцию: траловые передающие приборы серии NM, эхолоты серий CVR, SRM и SR.

Из выдающихся технических решений необходимо отметить разработку в 60-х гг. регистраторов с применением многоперьевой системы записи, использование которой позволило производить считывание информации как в прямом, так и в обратном направлениях, появилась возможность получить расширенную запись придонного слоя, а также разделить запись на ряд участков. Поскольку считывание осуществляется электронным способом, то в этом случае легко производить синхронизацию при дистанционной записи в приборах контроля параметров орудий лова.

В настоящее время фирма в этих приборах использует блоки цифровой обработки, что позволяет исключить трудоемкие и дорогостоящие в производстве многоперьевые самописцы и расширить информативные возможности указанных приборов. В числе первых фирма разработала цветные телевизионные индикаторы, которые экспортируются в 50 стран мира.

Фирма «Kaijo Denki CO, Ltd» в 1957 г. выпустила свой первый гидролокатор. Хорошо изучив достижения в области гидроакустической РПА и конъюнктуру на мировом рынке, фирма значительно усовершенствовала технологию промышленного производства этих приборов и выпустила на рынок целый ряд новых модификаций: аппаратуру для поиска китов WF-552, рыбоискатель кеты и горбуши с дистанционным управлением, а в 1973 г. купила лицензию у канадской фирмы «C-Tech» на гидролокатор одновременного кругового обзора LSS-30 и на ее основе выпус-

тила модель LSS-30 РЕТ-гидролокатора одновременного кругового обзора с электронным наклоном диаграмм направленности. Фирма ежегодно выпускает одну-две новые модели приборов. Имеет тесные контакты с фирмой «Kelvin Hughes» (Великобритания). В последние годы фирма в своих разработках широко использует электронное сканирование акустического луча как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскостях.

Фирма в основном занимается разработкой РПА, настройкой и регулировкой серийно выпускаемой аппаратуры, а изготовление приборов осуществляют дочерние фирмы. Фирма выпускает: эхолоты серий KMC и KFC-200; сканирующие гидролокаторы LSS-30 PFT, LSS-68, KSS-88, KCS-20, KCS-30, KCS-502, KCS-503; приборы контроля параметров орудий лова серий NF-30B, NT-30 и KCN-210 (с цветным дисплеем).

Фирма «Japan Radio Co. Ltd» (торговая марка JRC). Основное производство фирмы — радиоаппаратура. Фирма выпускает 10—20 % эхолотов от общего выпуска в Японии. Фирма поддерживает тесные связи с известными американскими фирмами, приобретая у них лицензии на технические и технологические решения, пользуясь их консультацией при проектировании и производстве.

Из заслуживающих внимания технических решений РПА фирмой разработан и освоен выпуск рыбопоискового гидролокатора Mono Pulse Sonar (NJA-600), в основе которого лежит моноимпульсная система с расщеплением луча, позволяющая использовать его на фоне повышенного уровня помех (мелководье, повышенная реверберация и т. п.).

Фирма выпускает: эхолоты с цветными индикаторами JFV-80, JFV-100, с индикаторами дисплейного типа JFV-216, JFS-316; электронносканирующие гидролокаторы JFS-800-360, JFS-800-180W; систему автоматического управления тралом.

Фирма имеет свои филиалы и представительства в США, Великобритании, Нидерландах, Испании, Индонезии, Франции и др. странах.

Все японские фирмы, занимающиеся выпуском различного радиоэлектронного оборудования, часть средств тратят на морское приборостроение, фирмы «Fugino» и «Koden» до 80 % своего капитала направляют на производство морских приборов.

Ведущие фирмы Японии широко привлекают к производству приборов мелкие фирмы, что позволяет им легко перестраивать собственное производство. Среди фирм существует широкая кооперация.

Большинство новых разработок ведется за счет собственных средств, но широко используются лицензии и других государств. Как правило, все фирмы разрабатывают базовую конструкцию определенной серии и на ее основе выпускают ряд моделей этой серии. В результате такой организации производства на рынке Японии находится до 100 различных эхолотов, до 20 модифика-

ций гидролокаторов и до 15 модификаций приборов контроля параметров орудий лова.

Норвегия. Фирма «Simrad» в 1950 г. выпустила свой первый эхолот, предназначенный как для навигации, так и для поиска рыбы, а в 1958 г. фирма уже изготовила 5000 эхолотов различных марок. Разработка новых конструкций РПА проводится в тесном сотрудничестве конструкторского бюро фирмы с судовыми гидроакустиками и научными работниками Морского исследовательского института. Фирма разработала несколько базовых моделей эхолотов, гидролокаторов и приборов контроля параметров орудий лова и на их основе выпускает модели для судов различного типа и назначения. В цехах фирмы в основном производится сборка аппаратуры, ее настройка и упаковка, а все компоненты поставляются по кооперации. В последние годы фирма стала широко использовать интегральные схемы и вычислительную технику производства США.

Фирма постоянно использует самые новые технические решения в области РПА, ею разработан целый ряд принципиально новых образцов РПА, опережающих по внедрению последних технических достижений другие зарубежные фирмы. В 1975 г. фирмой разработан индикатор ситуации лова Sonar Situation Display CD — приставка к гидролокаторам, придавшая однолучевым гидролокаторам новое свойство: возможность получать одновременную картину промысловой обстановки вокруг судна за счет использования элементов электронной памяти и вычислительной техники, выдавать рекомендации по облову косяка рыбы или автоматически его сопровождать. В 1981 г. фирма разработала электронно-сканирующий гидролокатор SM 600 с цветным дисплеем. В нем сконцентрированы последние достижения в области гидролокации как самой фирмы, так и других зарубежных фирм. Гидролокатор снабжен несколькими компьютерами, осуществляющими корреляционную обработку эхосигналов, определение центров плотностей косяков, их автоматическое отслеживание, обработку данных от навигационных приборов, корректировку координат целей, постоянный контроль правильности функционирования всех блоков, а также «диалог» с оператором. Оригинальной является разработанная фирмой система выдвижения антенны гидролокатора за обводы судна с использованием гибкого обтекателя из эластичной высокопрочной резины. Фирмой впервые в гидролокаторе Skipper 109 внедрена электромеханическая стабилизация антенны. Одной из последних ее выдающихся разработок является гидролокатор SX 200 со сферической антенной. Большинство технических решений фирмы защищены патентами, полученными в других странах. Фирма имеет самую мобильную разветвленную сервисную службу во всем мире и сеть коммерческих агентов. Фирма выпускает: эхолоты серий CS, EH, EK, EQ, EP, ES и др.; гидролокаторы серий SK3, SB, SU, SL, ST, SR и др.; эхолоты с буксируемыми антеннами; малогабаритный эхолот EU для оценки промысловых запасов во внутренних

водоемах; кабельные приборы контроля параметров орудий лова серий FM, FB, FL и др.; разнообразные приставки, тренажеры, эхоинтеграторы и другую аппаратуру.

США. Соединенные Штаты Америки до 1970 г. не занимались проектированием и изготовлением РПА. Однако более 20 фирм, три научно-исследовательские лаборатории, пять научно-исследовательских институтов, два центра подводных акустических исследований и два управления научных исследований занимаются исследованиями, разработкой и изготовлением самого различного гидроакустического оборудования. Многие из этих фирм создавали РПА совместно с фирмами других стран, например, Японии, Канады, Великобритании. Это объясняется тем, что США почти не занимаются рыбным промыслом, а рыбопродукты предпочитают покупать в других странах.

В начале 70-х годов фирма *«Western Marine Electronics Co»* (торговая марка *«Wesmar»*) разработала и выпустила на рынок рыбопоисковые гидролокаторы серии SS. Гидролокаторы этой серии отличаются высокой степенью унификации. Главное достоинство таких гидролокаторов заключается в том, что большинство из них имеют пассивную механическую систему стабилизации антенны от качки судна до 25°. Данные гидролокаторы быстро завоевали огромный спрос и авторитет на мировом рынке. Даже многие норвежские фирмы, занимающиеся ловом рыбы, несмотря на большой объем выпуска Норвегией собственной разнообразной РПА, предпочитают покупать гидролокаторы фирмы *«Wesmar»*, так как они конструктивно просты, в них использованы новейшие достижения электроники и гидроакустики. Кроме того, они относительно дешевы.

Фирма *«Wesmar»* широко использует опыт ведущих фирм страны по созданию гидроакустической техники, например, фирмы *«Raytheon»* и ее отделения *«Submarine Signal»*, разрабатывающих передающие тракты и вспомогательное оборудование, фирм *«Honeyell»* и *IBM*, разрабатывающих гидроакустические системы, отделения *«Government Systems»* фирмы *«Western Electric»* — разработчика единственного изготовления антенных систем и др.

Великобритания. Английская фирма *«Kelvin Hughes»* — одна из старейших фирм и первая, начавшая разрабатывать и выпускать РПА. В настоящее время фирма имеет большие связи с другими странами. Совместно с Японией ею разработан эхолот серии WG, который выпускается филиалами фирмы в США и ФРГ в трех модификациях. Основная специализация фирмы — эхолоты. Имеются шведское и канадское отделения фирмы. Фирмой *«Kelvin Hughes»* совместно с Канадой разработан гидролокатор одновременного кругового обзора LSS-30, в котором впервые в РПА применена цилиндрическая акустическая система. Фирме принадлежит приоритет в разработке электронной системы стабилизации ультразвукового луча, которая впервые использована в эхолоте Hamber KH-407.

Фирма выпускает: эхолоты серий MS, FDS и др., гидролокатор Fighergmans ASDIC.

В Гульском колледже разработан миниатюрный тренажер для обучения операторов РПА.

ФРГ. Фирма «*Krupp Atlas-Electronic*» основана в 1966 г. Продукция фирмы: гидролокаторы секторного обзора, эхолоты с электронной стабилизацией диаграммы направленности и приборы контроля параметров орудий лова с кабельным каналом связи.

Фирма отличается смелым внедрением новых технических решений в электронной части РПА своих разработок. К ним относятся электронная система стабилизации диаграммы направленности антенны эхолота с использованием элементов цифровой техники, мультипликативная система обработки подавления дополнительных максимумов диаграммы направленности антенны, регистраторы с одной частотой вращения пера, немелькающее изображение на электронных индикаторах, индикация на индикаторе вертикального разреза рыбного косяка, разветвленная система встроенного контроля и тестов, позволяющая производить проверку РПА на новостроящихся судах практически без выхода в море. Фирма широко внедряет элементы цифровой техники не только во вторичную систему обработки эхосигналов, но и в первичную.

Фирма имеет контакты с другими зарубежными фирмами и свои отделения в других странах. РПА фирмы пользуется большим спросом на международном рынке.

Фирма выпускает: эхолоты серий Atlas Fishfinder-600 и 700 и др.; гидролокаторы серий Atlas Fishing Sonar 950, системы контроля параметров орудий лова серий Atlas-Polynetz-Sonde-800.

Фирма «*Elac*» специализируется на разработке и выпуске эхолотов, гидролокаторов и приборов контроля параметров орудий лова с кабельным каналом связи. Фирма выделяется высокой блочной и приборной унификацией продукции. Все блочные компоненты РПА: антенны, поворотно-выдвижные устройства, регистраторы, индикаторы, усилители и т.п. имеют свою обособленную конструктивно законченную документацию. Из этих блочных компонентов и создается РПА новых модификаций. Фирма для стабилизации больших антенн эхолотов применяет электромеханическую систему стабилизации (эхолот Schelfrandlot 1 CO).

Фирма выпускает: эхолоты Ehomat Laz-53, Schelf-randlot 1 CO (им в основном вооружаются научно-исследовательские суда) и др., гидролокаторы серий Lodar и Sonar 1 BO, аппаратуру контроля параметров орудий лова серий Netsounding E.

Канада. Самая известная в Канаде фирма «*C-Tech*», которая специализируется на разработке электронносканирующих гидролокаторов одновременного кругового обзора с цилиндрическими антеннами и электронным наклоном диаграмм направленности. Наибольшую известность из них получили LSS-30 и LSS-30 PET.

Даже Японская фирма купила лицензии на эти гидролокаторы. Кроме того, фирма выпускает аналогичные гидролокаторы LSS-68, CSS-30 и гидролокаторы с цветными дисплеями CDS-40 Seamate, Spectra Scan 3000 и DCU-30.

§ 1.3. Развитие отечественной рыбопоисковой аппаратуры

В ноябре 1958 г. был выпущен первый отечественный рыбопоисковый эхолот «Окунь», а в 1959 г. — первый рыбопоисковый гидролокатор «Палтус». Практически с этого времени и отсчитывается начало развития отечественной РПА.

До этого отечественный рыбопромысловый флот не имел гидроакустической поисковой техники. Флот нуждался в повышении эффективности работы, в первую очередь, за счет вооружения промысловых судов гидроакустической рыбопоисковой техникой. Поэтому период с конца 50-х и до начала 60-х гг. характеризуется интенсивным развитием разработок и серийным освоением целого ряда новой отечественной РПА: эхолоты «Кальмар», «Дельфин», «Судак», «Язь», «Омар», гидролокаторы «Палтус-М», «Омуль» и другая аппаратура. Это первое поколение отечественной РПА, выполненной преимущественно на магнитострикционных преобразователях и электронно-вакуумных приборах. По своим тактико-техническим параметрам эта аппаратура не уступала лучшим зарубежным образцам. Особого внимания среди разработок этого поколения заслуживают гидролокатор «Палтус-М» и эхолоты «Язь» и «Омар».

Эти эхолоты уже в то время имели пьезокерамические антенны, кроме того, элементная база малогабаритного переносного эхолота «Язь» полностью была выполнена на полупроводниковых приборах, а эхолот «Омар» имел две рабочие частоты. Гидролокатор «Палтус-М» обладал хорошими тактико-техническими параметрами и высокой надежностью в работе. О высоком качестве и техническом уровне разработок РПА говорит тот факт, что вот уже более 20 лет без единой модернизации серийно выпускается большими партиями эхолот «Язь».

Период второй половины 60-х и начала 70-х годов характеризуется разработкой второго поколения отечественной РПА. Сюда относятся гидролокаторы «Ерш», «Лещ», «Палтус-МП», «Финвал», эхолоты «Спрут», «Кальмар-П», «Муксун», аппаратура контроля параметров орудий лова с гидроакустическим каналом связи «Ленинград», «Горизонт», с кабельным каналом связи ИГЭК, индикатор-приставка кругового обзора «Сектор» и другая аппаратура. РПА второго поколения отличается широким внедрением полупроводниковой техники. Особого внимания из разработок этого периода заслуживают гидролокатор «Финвал» — первый отечественный гидролокатор одновременного широкосекторного обзора (60°) и аппаратура ИГЭК — первая аппаратура, дающая информативные сведения о параметрах траля.

РПА третьего поколения, разработанная в 70-х годах, выпол-

нена полностью на полупроводниковой технике с использованием унифицированных функциональных узлов и отличается комплексированием аппаратуры. К этому поколению относятся такие известные разработки, как комплексы «Прибой-101», «Сарган-К», «Кумжа», «Лещ-Б», электронно-сканирующий гидролокатор для обнаружения придонной рыбы в стороне от судна «Пикша», научно-исследовательские шумопеленгаторные станции «Чайка» и «Биозвук», аппаратура контроля параметров орудий лова с гидроакустическим каналом связи СКОЛ и СКОЛ-1500, с кабельным каналом связи ИГЭК-УМ, «Игла», «Дейма» и другая аппаратура. РПА этого поколения имеет энергетические параметры обнаружения биологических объектов в 1,5—2 раза большие, чем РПА первого и второго поколения, или принципиально новое назначение («Биозвук», «Чайка», СКОЛ). В процессе создания третьего поколения РПА был решен целый ряд новых технических проблем. К ним относятся: создание двухчастотных антенн, возможность контролирования параметров орудий лова, использование буксируемых антенн, применение многоперьевой системы записи эхосигналов, возможность просмотра расширенных участков рабочих диапазонов и изучение с помощью аппаратуры звуков самих биологических объектов океана, новые системы индикации, встроенный контроль параметров аппаратуры, система привязки к грунту и др. РПА третьего поколения по энергетическим параметрам является самой мощной в мире. Так, гидролокатор «Прибой-101» имеет дальность действия по рыбным скоплениям до 3000 м, а эхолот «Прибой-101» — по одиночной рыбе — 1200 м. Комплекс «Кумжа» при использовании буксируемых антенн в режиме гидролокатора обеспечивает дальность действия в траверсном направлении до 6000 м, а в режиме эхолота по глубине — до 1500 м. Гидролокатор и эхолот комплекса «Сарган-К» работают на двух значительно разнесенных рабочих частотах 20 и 135 кГц при наличии одной антенны.

Приборы контроля параметров орудий лова способны давать информацию о параметрах трала и промысловой обстановке вокруг него на глубинах до 1500 м при отстоянии трала от судна до 4000 м.

В XI пятилетке начата разработка РПА четвертого поколения, которая выполняется в основном на микросхемах с широким использованием мини- и микроЭВМ. Характерной особенностью аппаратуры четвертого поколения является электронное сканирование акустического луча как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскостях обзора с использованием плоских и цилиндрических акустических систем. Это гидролокаторы одновременного секторного и кругового обзоров с плавным электронным наклоном диаграмм направленности в вертикальной плоскости и эхолоты с электронной стабилизацией диаграммы направленности или ее сканированием в мидельной плоскости судна. Дальность действия гидролокаторов этого поколения достигает 3500 м, эхоло-

тов — 2000 м, глубины погружения приборов контроля параметров орудий лова до 2000 м.

В этот период в разработки РПА внедрен ряд сложных научно-технических и новых инженерных решений, выдвинутых проблемами современного рыбного промысла. К ним прежде всего относятся: создание автоматизированных промыслово-навигационных комплексов отображения промысловой ситуации лова с использованием мини- и микроЭВМ, практическое использование в РПА эффекта нелинейной гидроакустики, широкое внедрение методов цифровой обработки в первичную и вторичную системы обработки сигналов, применение электронной стабилизации диаграмм направленности антенн и др. Широкое внедрение в новые разработки последних достижений микроэлектроники и элементов цифровой техники позволили разработать: цветные электронные индикаторы телевизионного типа, электронные индикаторы-дисплеи с немелькающим изображением, панорамные регистраторы с постоянной скоростью движения пера, встроенный автоматический контроль параметров аппаратуры и др.

Большинство этой аппаратуры разработано в различных вариантах комплектации и поставок, что значительно расширяет ассортимент, применяемость и возможность установки ее на судах различных классов с учетом конкретных задач промысла.

Советские конструкторы за очень короткий период развития нового технического направления — немногим более 25 лет — создали большое количество типов и модификаций аппаратуры для нужд рыбного промысла и рыбохозяйственных задач.

Многие технические вопросы на практике были внедрены в аппаратуру советскими конструкторами впервые в мире. Особо важными из них являются следующие: двухчастотные антенны, использование в РПА эффекта нелинейной гидроакустики, применение буксируемых антенн, первичная (пространственно-временная) обработка сигналов с использованием методов цифровой обработки, поплавковая система стабилизации антенны, много новых конструктивных решений внесено в системы контроля параметров орудий лова и др.

Как правило, все новые технические решения защищены авторскими свидетельствами на изобретения.

В настоящее время, учитывая большой накопленный опыт отечественного конструирования РПА, в процессе создания новой РПА внедряется машинный метод проектирования с использованием ЭВМ, новых достижений других областей науки и техники, математическое моделирование процессов, конструктивных узлов и аппаратуры в целом и современной элементной базы, аппаратура становится более универсальной, с большим объемом необходимой информации о промысловой обстановке.

Учитывая, что наша страна является одной из ведущих стран в области мирового рыболовства, отечественная РПА должна не только отвечать требованиям рыболовства сегодняшнего дня, но и предвосхищать возможные спонтанные изменения в характере

рыболовства, а следовательно иметь гибкие технические параметры, которые соответствовали бы меняющимся требованиям промысла. Под этим следует понимать наборы различных мощностей, длительностей импульсов излучения и полос пропускания приемных трактов, использование различных наборов рабочих частот, различных типов информативных индикаторов и т. д.

Глава 2

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ РЫБОПОИСКОВОЙ АППАРАТУРЫ

§ 2.1. Аппаратура, различающаяся по способу локации

Гидроакустические системы или гидроакустическая аппаратура — это совокупность схемно и конструктивно связанных акустических, электрических и электронных приборов и устройств, с помощью которых производится излучение и (или) прием акустических колебаний в воде для решения определенных задач.

Гидроакустическая рыбопоисковая аппаратура (РПА) является наиболее типичным представителем гидроакустических систем во всем их многообразии. Она имеет значительное число вариантов построения, отличающихся методами технической реализации, обработки гидроакустической информации, способами локации, методами обзора акватории, типами решаемых задач и т. д.

В настоящее время используются два основных гидроакустических способа подводной локации — пассивная и активная.

Пассивная гидролокация — это способ установления наличия подводных объектов и определения их свойств, основанный на приеме и обработке акустических сигналов, создаваемых или изучаемых этими объектами. При пассивной локации реализуется следующая структурная схема: объект локации — водная среда — приемная система — индикаторный процесс.

Активная гидролокация — это способ установления свойств подводных объектов, основанный на излучении гидроакустических сигналов, приеме и обработке эхосигналов, которые возникают в результате отражения (или рассеяния) от этих объектов. При активной гидролокации структурная схема такова: излучающая система — водная среда — объект локации — водная среда — приемная система — индикаторный процесс.

Рыбные объекты не являются источником достаточно мощного гидроакустического поля, поэтому пассивная гидролокация как метод подводного наблюдения в рыбопоисковой технике используется очень ограниченно и применяется только для специальных

(в основном для исследовательских) целей. Гидроакустические станции, работающие на принципе пассивной локации, называются шумопеленгаторами. Схема шумопеленгатора содержит преобразователи для приема акустических сигналов и преобразования их в электрические, тракт усиления и приборы индикации для обработки принятых сигналов и воспроизведения их в виде необходимой оператору информации. Шумопеленгаторы бывают направленного и ненаправленного действия. Шумопеленгаторы направленного действия позволяют определять направление на отдельные объекты первичного источника звука относительно станции наблюдения. Шумопеленгаторы ненаправленного действия дают информацию только о наличии источника сигнала в районе действия данной станции.

В случае пеленгования бесшумных целей, каковыми на практике считаются рыбные объекты, в состав станции вводится передающий тракт для создания акустических колебаний в водной среде. В этом случае излучаемая энергия после достижения цели отражается от нее, а эхосигналы (или сигналы вторичного поля) принимаются станцией, называемой гидролокационной станцией активного действия. Системы активной гидролокации, о которых идет речь в данной книге, различаются методами временной модуляции посылаемого сигнала и способами обзора пространства. Для определения расстояния до объекта чаще всего пользуются импульсной, частотной и шумовой модуляциями сигнала.

При импульсной модуляции расстояние r до цели находится по времени запаздывания t отраженного импульса $r = ct/2$, где c — скорость звука в воде. При частотной модуляции частота f излучаемого сигнала меняется во времени t , например, по линейному закону $f(t) = f_0 + \beta_{\text{н}}t$, где f_0 и $\beta_{\text{н}}$ — нижняя граничная частота и скорость изменения частоты. Отраженный сигнал, принятый приемником, отличается по частоте от сигнала, излучаемого в данный момент, так как принятый эхосигнал представляет собой задержанную на время t копию посланного сигнала. Для неподвижной цели разность частот излучаемого и принимаемого сигналов является постоянной и равной $F_{\text{н}} = \beta_{\text{н}}t$. Выделив разностную частоту $F_{\text{н}}$, определяют расстояние r до цели по формуле $r = cF_{\text{н}}/2\beta_{\text{н}}$. Аналогична схема действия гидролокатора с шумовым излучением и корреляционной обработкой сигнала.

Гидролокационные системы активного действия подразделяются на гидролокаторы горизонтально-вертикального действия, в дальнейшем их будем называть просто гидролокаторами, и гидролокаторы вертикального действия — эхолоты. Акустическая антенна гидролокатора с помощью специальных устройств ориентируется в вертикальном и горизонтальном направлениях, что позволяет определить направление на пеленгуемый объект, а также угол места. В эхолотах акустическая антенна производит обзор пространства непосредственно под судном.

На рыбном промысле помимо названных гидролокаторов и эхолотов широко используются и другие приборы активной локации:

Т а б л и ц а 1. Сводные сведения по классификации отечественной и зарубежной гидроакустической рыбопоисковой аппаратуры

Признак классификации	Подклассы	Страна, фирма	Марки (наименования) приборов
Комплексы		СССР ФРГ, Крупп Япония, Furuno	Прибой-101, Сарган, Кумжа, Таймень, Таймень-С, Стерлядь JFFS SSS-DS, TS-32-Mark-II
Гидролокаторы	Однолучевые	СССР Япония, Furuno Япония, JRS Япония, Kaijo Denki ФРГ, Elac США, Wesmar Норвегия, Simrad	Палтус, Палтус-МП, Прибой-101, Сарган-Г, Лещ, Лещ-Б, Омуль, Пескарь SRM-673, SR-670, SR-670A, FH-106, FH-106A, FH-205, FH-101, FH-103, FH-105, FH-203, FH-203B, FH-203C, FH-501, Videograp H NJA-900A-E W-32-5, W-20-1 Mini-Lodar, Mittel-Lodar, Standart-Lodar, Super-Lodar, Sonar-1B0 SS-80, SS-90, SS-110, SS-115, SS-120, SS-140, SS-150, SS-160, SS-165, SS-200B, SS-220, SS-220A, SS-230, SS-240, SS-250, SS-170, SS-290, SS-300 SQ-D, SQ-4, SL, SU, SU-2, SB-2, SB-3, Master Sonar, ST, Skipper Sonar, BQS Sonar, SK-2, SK-3, Skipper-101, Skipper-109
	Секторного обзора	СССР ФРГ, Крупп ФРГ, Elac	Финвал, Пикша, Таймень, Таймень-С Atlas Fishing Sonar-950, Atlas Fishing Sonar-960 Panorama Lodar

		Япония, Furuno Япония, JRC Япония, Kaijo Denki Норвегия, Simrad	FSS-75B, FSS-75A, FSS-88B, CH-12, FSS-10A, FSS-11A, CS-70, FUG-400W JFS-688, NJA-600, JFS-800-180W LSS-68, KSS-88 SM600
	Одновременного кругового обзора	СССР Канада, C-Tech Канада, Scannar Engineering Япония, Furuno Япония, Kaijo Denki Норвегия, Simrad	Угорь LSS-30, LSS-30PET, CDS-40 Seamate, Spectra Seap-3000 MAQ-32, MAQ-60 FSS-32B, FSS-40B, CS-30, CS-50, FSS-28B, FSS-31C, FSS-36B, FSS-45B LSS-30PET (по лицензии Канадской фирмы C-Tech), KCS-20, KCS-30, KCS-502, KCS-503 SX200
Эхолоты		СССР ФРГ, Kрупп ФРГ, Elac Япония, Furuno	Окунь, Судак, Кальмар, Кальмар-П, Язь, Язь-С, Муксун, Спрут, Омар, Прибой-101, Сарган-Э, Сарган-ЭМ, Таймень, Таймень-С, Пескарь, Плавник, НЭЛ-5Р Atlas Fischfinder-700, Atlas Fischfinder-791DS Schelfrandlot 1CO, LAZ-100, LAZ-2500 FE-300, FE-400, FE-600, FE-502, Mark-II, FE-881, FE-813, FE-814, FE-824, FUV/FUG, FWGT, FCV-121B, FCV-201

Признак классификации	Подклассы	Страна, фирма	Марки (наименования) приборов
Эхолоты		Япония, Коден Япония, JRC	CVS-881, CVS-881B, CVS-882, CVS-883, CVS-885, SRM-681, SRM-871, CVS-8800, CVS-8802 NJA-130, NJA-170, NJA-5050, NJA-176, NJA-192, NJA-195, NJA-198, NJA-302D, NJA-307D, NJA-305D, NJA-308D, NJA-320D, NJA-321D, TH-108, JFV-516, JFV-80, JFV-100, JFV-216, JFV-316 Z-171, Z-181, YS-552, Z-601, HSW-33, SW-33, S-33, S-43, S-63, W-33, W-43, W-44, W-63, KMC, KFC-200 ES-2, EK, ET100, ET102, EK-S, EQ, EK400 MS300, MS315, MS351, MS353, MS356, MS640, MS838, WG-45, WG-75, WG-115
Приборы конт-роля параметров орудий лова	Связь по кабелю	СССР ФРГ, Krupp ФРГ, Elac	ИГЭК, ИГЭК-У, ИГЭК-УМ, Игла, Глубина Atlas-Netzsonde-200, Atlas-Poljnetz-840, Atlas-Poljnetz-860, Atlas-Poljnetz-870 Netz sounding E-2600

		Норвегия, Simrad	FL-Trawl Watd, FB-Trawl-Ede, Trawl System
	Связь по гидро-акустическому каналу	СССР Япония, Fujiho Япония, Koden Япония, Kaijo Denki	Ленинград, Горизонт, СКОЛ, СКОЛ-1500, СКОЛ-2000Р FNR-2, FNR-3, FNR-30, FNR-200МКII, FNR-400МКII, FNR-100, FNR-200, FNR-600, FNR-780МКII, FNZ-4Р, FNZ-5Р, FNZ-6Р, FNZ-5А, FNZ-6А, FNZ-7А, FNZ-3МВМКIII NM-850, NM-850А, NM-850АТ, NM-853Т, NM-857 NF-14В, NF-15В, NF-11В, NF-30В, NT-30, KCN-210
Параметрические приборы	Моно- и многочастотные		Гидролокаторы и эхолоты: Пескарь, ПГЛ-300, ПГЛ-2, ПГЛ-2А, ПГЛ-3, ПГЛ-4, ПГЛ-5, ПГЛ-5М, Paso-30, FADS, Глория Измерительные излучатели: НАП-3, НАП-4, НАИ-5, НАИ-6, НАИ-7, НАИ-8, НАИ-9 Буксируемые гидролокаторы и аппараты: НГА-1, НГА-1М, НГА-2 Акустический лаг PADS Гидролокатор ПГЛ-5М Буксируемый подводный аппарат НГА-1М Рыбопоисковый эхолот Сарган-ЭМ и ПГЛ-5М
	Сложные сигналы	СССР	
	Сигналы самодетектирования	СССР	

приборы контроля параметров орудий лова, навигационные эхолоты, гидроакустические лаги, гидроакустические маяки и станции специального назначения и др. Выпускаемые марки приборов, отличающихся способом локации, перечислены в табл. 1*.

§ 2.2. Классификация гидролокаторов по способу обзора

Основное назначение гидролокаторов состоит в получении информации о всей подводной обстановке вокруг промыслового судна. По способу обзора акватории для решения задачи кругового обзора гидролокаторы делятся на три группы: шагового обзора; секторно-шагового обзора; одновременного кругового обзора.

Гидролокатор шагового обзора осуществляет обзор акватории дискретным (шаговым) перемещением одной относительно узкой диаграммы направленности (ДН) в горизонтальной плоскости при помощи электромеханического разворота акустической системы (АС) в заданном секторе. Часто гидролокаторы этого типа по аналогии с лучом прожектора называют прожекторными или однолучевыми. Как правило, в гидролокаторах шагового обзора имеются режимы автоматического и ручного разворота АС в горизонтальной и вертикальной плоскостях обзора. Направление на цель определяется обычно методом максимального сигнала по ориентации АС в зону максимального уровня эхосигнала.

Упрощенная структурная схема гидролокатора шагового обзора приведена на рис. 2.1. Важно подчеркнуть, что АС в традиционных гидролокаторах выполняет две разнородные функции: преобразование энергии электрической в акустическую или обратно и формирование направленного излучения или приема сигналов. Поворотное-выдвижное устройство (ПВУ) по сигналам от блока управления (БУ) разворачивает АС в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Коммутатор приема—передачи (КПП) выполняет функции переключения режимов излучения и приема. Генераторное устройство (ГУ) вырабатывает мощные электрические импульсы определенной формы и длительности для подачи их на АС в режиме излучения. Усилитель (У) усиливает и обрабатывает принятые АС эхосигналы от цели для подачи их на приборы воспроизведения информации (ПВИ), которые в конечном итоге представляют оператору полученные данные о цели в форме, удобной для их анализа и принятия решения. БУ синхронизирует и управляет всей работой гидролокатора.

Гидролокаторы шагового обзора имеют одну ДН и обеспечивают за один цикл излучение—прием обзор акватории в телесном угле, определяемом шириной ДН. Основными недостатками таких гидролокаторов является малая скорость обзора, особенно при работе на больших дистанциях, и наличие значительных непро-

* В таблице приведены основные марки гидроакустической РПА, эксплуатируемой в настоящее время на судах или имеющейся на коммерческом рынке.

смотренных участков при движении поискового судна с повышенной скоростью, а также отсутствие возможности одновременного наблюдения за несколькими целями без применения специальных средств обработки сигналов.

Гидролокатор секторно-шагового обзора позволяет одновременно обследовать акваторию в определенном секторе с помощью быстросканирующей узкой ДН в приеме или излучении или других манипуляций с ДН, осуществляемых электронными схемами, при неподвижной АС, а также дополнительно производить обследование более крупного заданного сектора в пределах углов $\pm 180^\circ$ путем электромеханического разворота АС. Наклон ан-

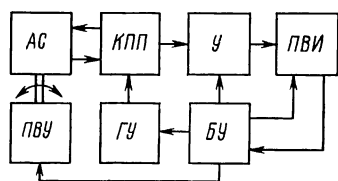


Рис. 2.1. Структурная схема гидролокатора шагового обзора.

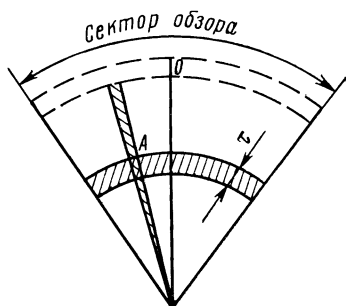


Рис. 2.2. К объяснению способа внутриимпульсного сканирования приемной ДН гидролокатора секторно-шагового обзора.

тенны в вертикальной плоскости производится чаще всего электромеханическим способом.

Существует несколько разновидностей построения секторных электронно-сканирующих гидролокаторов. Рассмотрим два наиболее характерных варианта построения указанных гидролокаторов [42, 47]. В первом варианте АС формирует ненаправленное излучение во всей горизонтальной плоскости (плоскости обзора) либо в широком ее секторе, а в вертикальной плоскости формируется заданная ширина ДН. Прием эхосигналов осуществляется АС с узкой ДН, которая после окончания излучаемого импульса посылки с большой скоростью автоматически поворачивается (сканируется) в горизонтальной плоскости в пределах заданного сектора (рис. 2.2).

Если, например, зондирующий импульс длительностью τ распространяется от АС в водной среде, занимая в какой-то произвольный момент времени пространство, ограниченное дугами (заштрихованная полоса на рис. 2.2), то любые объекты, находящиеся в данный момент в пределах указанной полосы, будут облучаться акустической энергией. Пусть далее в точке А находится какой-либо отражающий объект, узкая приемная ДН

пересекает вышеуказанную заштрихованную полосу в точке A в момент прихода эхосигнала от этого объекта к АС. Тогда указанный эхосигнал будет принят и воспроизведен на индикаторе. Если приемный луч непрерывно перемещается поперек заданного сектора с такой скоростью, что он последовательно перекрывает всю ширину сектора, прежде чем излученный импульс (занимающий по ширине заштрихованное пространство) перемещается дальше от АС на свою полную длину в воде (т. е. в пределах промежутка времени, равного по длительности τ), тогда могут быть приняты и воспроизведены эхосигналы от всех объектов, находящихся

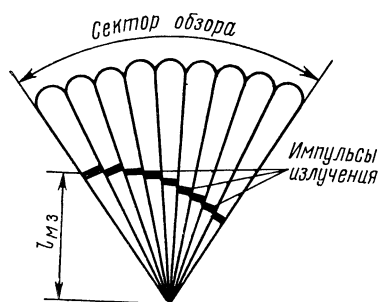


Рис. 2.3. К объяснению способа последовательного зондирования акватории гидролокатором секторно-шагового обзора.

в воде в пределах сектора сканирования и в пределах дальности действия гидролокатора без каких-либо пропусков информации с этого сектора. Такое сканирование называется внутримпульсным сканированием. В этом случае для зондирования требуемого пространства необходима большая мощность излучения (и соответственно мощное ГУ). Длина мертвой зоны $l_{м.з.} = \tau c/2$ в рассматриваемом варианте минимальная.

В другом варианте посылка зондирующего импульса осуществляется с помощью электронного сканирования луча с узкой ДН.

Этот вариант получил название последовательного зондирования (рис. 2.3). В режиме приема в этом случае может быть одна узкая ДН, сканирующая с высокой скоростью в заданном секторе, аналогично описанной выше, или статический веер приемных ДН, одновременно перекрывающий весь просматриваемый сектор. В данном типе гидролокатора существенно снижается необходимая мощность ГУ. Однако усложняется конструкция коммутирующих устройств и образуется значительная мертвая зона за счет большого числа m последовательных направлений излучения $l_{м.з.} = \tau c m/2$. Появляется также дополнительная погрешность в отсчете дальности до цели, так как прием начинается после окончания цикла излучения или после окончания излучения среднего (центрального) направления с целью располовинивания погрешности по дистанции.

Упрощенная структурная схема одной из равновидностей секторно-шагового гидролокатора представлена на рис. 2.4. В состав схемы помимо известных блоков из гидролокатора шагового обзора входят дополнительные блоки. Необходимая длительность импульсов посылки τ вырабатывается формирователем при поступлении сигналов запуска от самописца или электронного индикатора через БУ. Формирование ДН в излучении осуществляется с помощью фазосдвигающих цепей (ФСЦ). Высокочастот-

характерно для всех трех случаев). В этом случае для облучения акватории необходима самая большая мощность при минимальной мертвой зоне;

— облучение осуществляется с помощью электрического сканирования луча с узкой ДН. В этом варианте существенно снижается мощность ГУ, однако усложняется конструкция коммутрующих устройств и образуется значительная мертвая зона за счет большого количества направлений излучений;

— третий вариант является промежуточным между первым и вторым. В этом случае одновременно излучается несколько (чаще всего три) узких ДН, сдвинутых в горизонтальной плоскости

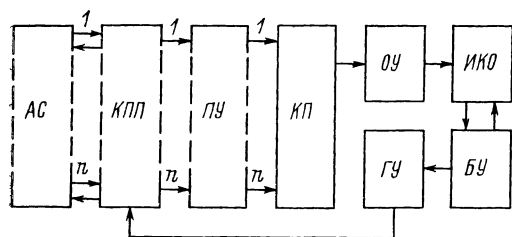


Рис. 2.5. Структурная схема гидролокатора одновременного кругового обзора.

друг относительно друга на определенный угол (120°), которые электрически сканируются с помощью коммутлирующего устройства. Величина мертвой зоны по сравнению со вторым вариантом уменьшается (в три раза), но увеличивается мощность и соответственно габариты ГУ.

Для решения второй задачи — быстрого просмотра окружающей акватории в секторе 360° без пропусков используется веер приемных статических ДН или быстрое сканирование (внутриимпульсное) одной приемной ДН со скоростью, обеспечивающей круговой обзор без пропусков. Для этого ДН должна осуществлять один полный оборот за время $t_{\text{ск}}$ меньше минимально возможной длительности эхосигнала с любого направления ($t_{\text{ск}} < \tau$). Вращение ДН осуществляется с помощью электронного коммутатора с частотой сканирования, равной $f_{\text{ск}} = 1/t_{\text{ск}}$. Синхронно с вращением ДН в реальном масштабе времени производится и развертка на электронном индикаторе кругового обзора. Эхосигнал с каждого направления состоит из «выборок», получающихся за счет быстрого сканирования приемной ДН.

Способ приема с помощью веера приемных статистических ДН предусматривает наличие в составе гидролокатора ЛЗ, каждая из которых формирует ДН. Соседние ДН, пересекаясь на уровне 0,7 (минус 3 дБ) по звуковому давлению, одновременно перекрывают сектор 360° . Для отображения обстановки на индикаторе кругового обзора в этом случае необходим электронный коммутатор, который должен подключать выход каждой статической ДН к электронному индикатору. Достижения микроэлектроники позволили реализовать наклон ДН в вертикальной плоскости электронным способом в пределах определенных углов. Данный метод ведет к значительному увеличению количества каналов АС и станции в целом $N = mn$, где m — количество каналов, необходимых для обзора в горизонтальной плоскости; n —

количество поясов АС, обеспечивающих наклон ДН в вертикальной плоскости в пределах требуемого угла.

Упрощенная структурная схема одного из вариантов гидролокатора одновременного кругового обзора представлена на рис. 2.5. КП опрашивает каналы ПУ за время, равное длительности импульса послышки. Число каналов, опрашиваемых одновременно, зависит от выбора ширины ДН. В КП имеются ЛЗ, которые служат для компенсации сдвигов фаз, обусловленных кривизной дуги, образованной элементами цилиндрической АС, участвующими в формировании ДН. После КП сигналы усиливаются ОУ и поступают на индикатор кругового обзора (ИКО), как правило, со спиральной разверткой и яркостной отметкой сигнала. В приведенном примере излучение акустической энергии — ненаправленное, наклон ДН отсутствует.

Классификация конкретных марок гидролокаторов по способу обзора приведена в табл. 1.

§ 2.3. Классификация аппаратуры по характеру решаемых задач

Основное назначение РПА — поиск и обнаружение рыбных скоплений. Однако функции, выполняемые РПА, многообразнее и зависят от решаемых задач, связанных с особенностью промысловых районов, метеоусловий, орудий лова, типов судов и других факторов. По общим признакам решаемых задач РПА можно сгруппировать (см. табл. 1) в отдельные подклассы: гидролокаторы, эхолоты и гидроакустическую аппаратуру контроля параметров орудий лова.

В задачу гидролокаторов входит поиск, обнаружение и классификация рыбных скоплений в стороне от судна на дистанциях, обеспечивающих возможность осуществления судном маневра для успешного наведения орудий лова на обнаруженное рыбное скопление. Гидролокаторы, эксплуатируемые в настоящее время на рыбном промысле, позволяют производить поиск рыбных скоплений на дистанциях от десятков метров до 3500 м и более. Основное назначение эхолотов — определение глубины и обнаружение одиночной рыбы и рыбных скоплений непосредственно под корпусом судна на заданных глубинах. Современные эхолоты обеспечивают обнаружение одиночной рыбы на глубинах от единиц метров до 2000 м и более.

Дальность действия гидроакустической аппаратуры ограничивается многими факторами и, в первую очередь, рефракцией звуковых лучей. Фактическая дальность действия гидролокатора может значительно отличаться от его энергетической дальности в зависимости от гидрологических условий района работы. В последнее время с целью увеличения зоны гидроакустического зондирования акватории помимо традиционных подкильных антенн, размещаемых непосредственно в корпусе судна, применяют гидроакустическую РПА с буксируемыми антеннами, называемыми

иногда антеннами переменной глубины [29, 39]. В этом случае антенны эхолота и гидролокатора размещаются в специальном носителе, буксируемом за судном с помощью кабель-троса на определенном заглублении. Заглубление буксируемых носителей достигает несколько сот метров. Информативная связь АС с электронной аппаратурой, находящейся на борту судна, осуществляется по кабель-тросу. Применение в РПА антенн переменной глубины позволяет получить следующие преимущества перед антеннами, размещаемыми на корпусе судна:

- появляется возможность работы РПА при различных гидрологических условиях, используя погружение АС под слой температурного скачка скорости звука вплоть до оси звукового канала;

- уменьшается влияние помех от винта и других механизмов судна, а также от кильватерной струи;

- при заглублении антенн происходит уменьшение влияния на них штормового моря (они находятся ниже аэрированного поверхностного слоя), появляется возможность работы аппаратуры в любых погодных условиях;

- можно повышать излучаемую акустическую мощность при заглублении АС за счет повышения внешнего гидростатического давления;

- достигается стабилизация ультразвукового луча ДН антенн при волнении моря путем заглубления их в относительно спокойные слои без дополнительных специальных затрат для этих целей;

- улучшаются условия обслуживания АС и их ремонта.

Нужно отметить, что наряду со значительными преимуществами гидроакустической РПА с буксируемыми антеннами имеются и некоторые специфические особенности, усложняющие практическую реализацию этих устройств. В этом случае необходимо наличие специального носителя буксируемых антенн обтекаемой формы, обладающего заданными гидродинамическими свойствами, специального кабель-троса необходимой прочности, обеспечивающего минимальный шум при буксировке, наличие на судах дополнительного буксировочного подъемно-спускного оборудования и дополнительных площадей на палубе для размещения носителя и вспомогательных механизмов.

В рыболокации помимо известных гидролокаторов и эхолотов широко применяется гидроакустическая аппаратура контроля параметров орудий лова (в основном тралов). Созданная аппаратура имеет два типа связи между орудиями лова и судном: по кабелю и телеметрическому гидроакустическому каналу.

В первом случае на трал устанавливается дополнительная антенна, которая через специальный кабель и переключатель включается в схему бортовой гидролокационной станции (чаще всего эхолота). Дополнительный вибратор закрепляется на нижней или верхней подбуре трала зеркалом антенны вверх или вниз. В зависимости от этого за счет излучения акустической энергии и приема отраженных эхосигналов от соответствующей подбуре трала и от поверхности или дна моря (а по пути и от рыбы) по

приборам индикации эхолота определяют величину вертикального раскрытия трала, положение трала либо относительно поверхности, либо относительно дна, а также заход рыбы в трал.

Во втором случае аппаратура состоит из автономного измерительно-передающего устройства, которое устанавливается на трале, приемной антенны с широкой ДН, буксируемой за судном и связанной кабелем через лебедку с электронной аппаратурой на борту. Приборы обработки и индикации расположены непосредственно на борту судна. Фактически такая гидроакустическая аппаратура представляет собой сочетание одного или нескольких гидролокаторов или эхолотов и аппаратуры связи, размещаемых непосредственно на орудии лова и дающих информацию о промысловой обстановке вокруг него. Автономное измерительно-передающее устройство представляет собой герметичный прибор, выдерживающий большие гидростатические давления, в котором находятся электронные схемы генераторов, усилителей, кодирующих устройств и др. блоков. На корпусе прибора расположены зондирующие антенны (либо несколько эхолотных, чаще всего смотрящих вверх или вниз, либо кругового обзора) и антенна связи. Полученная информация зондирующими антеннами в районе трала обрабатывается, кодируется и по телеметрическому гидроакустическому каналу передается на приемную антенну, а затем через дешифрирующие устройства — на приборы индикации. Существующая в настоящее время аппаратура данного типа позволяет измерять: величину раскрытия трала, отстояние трала от грунта, поверхности моря (глубину хода трала), заход рыбы в трал (наполнение трала), прохождение рыбы мимо трала (потери), координаты отстояния трала относительно судна и температуру воды в районе трала. Эти параметры позволяют оперативно производить маневрирование тралом с целью выбора оптимального режима траления, точно знать время наполнения трала, а также своевременно предупреждать и исключать возможности зацепов, повреждений и потерей тралов. Современные измерительно-передающие устройства могут погружаться с тралом до глубины 2000 м, а надежная работа канала связи обеспечивается до 4000 м. Аппаратура контроля параметров орудий лова эффективно работает в комплексном сочетании с гидролокатором и эхолотом. Основные требования к данному типу аппаратуры — высокая точность измерения параметров и повышенная информативность.

Особое место занимает гидроакустическая РПА, используемая с помощью вертолета. В задачу данной аппаратуры входит быстрый просмотр больших площадей акватории. Работа осуществляется в этом случае следующим образом: прилетев в район поиска (с берега или плавбазы), вертолет записывает в исходной точке и опускает с помощью лебедки на кабель-тросе контейнер с АС. Производится круговой обзор акватории (при необходимости какое-то направление просматривается более тщательно), затем контейнер поднимается на борт, и вертолет перелетает в следующую

точку зависания. Расстояние между точками зависания выбирается обычно равным $l = (1,4 - 1,5) r$, где r — дальность действия гидролокатора. Эффективность обследования водных районов данным типом аппаратуры очень высока за счет большой скорости смены позиций вертолетом или использования нескольких вертолетов. После обнаружения рыбных скоплений вертолет по радио наводит на них промысловые суда.

§ 2.4. Комплексирование аппаратуры

В последнее время при проектировании новой гидроакустической РПА большое внимание уделяется вопросу комплексирования аппаратуры — логическому и функциональному объединению в единое целое отдельных типов аппаратуры с различными задачами, режимами работы и методами обнаружения с целью повышения производительности поиска, улучшения эффективности процесса облова, максимальной унификации и надежности систем. Такие комплексы создаются не простым механическим объединением станций и приборов, а с учетом анализа решаемых задач данного типа носителя гидроакустической РПА, взаимодействия входящих в комплекс устройств, а также дублирования и взаимозаменяемости отдельных режимов работы или приборов.

Наиболее типичным примером такого комплексирования РПА является гидроакустическая судовая аппаратура отображения промысловой ситуации лова. Она предназначена для обработки в реальном масштабе времени информации от гидроакустических и электронавигационных приборов, представления результатов обработки на экране дисплея в удобной для восприятия форме с обязательным отображением взаимного положения судна, орудий лова и обнаруженных скоплений рыбы, выдачи рекомендаций по наведению орудий лова на выбранное для облова рыбное скопление. Эта аппаратура, основой которой является ЭВМ или спецпроцессоры, дисплей и блок согласования с источниками информации (интерфейс), включает в свой состав или получает исходную информацию от гидролокатора, эхолота, аппаратуры контроля параметров орудий лова, доплеровского гидроакустического лага, гирокомпаса, гировертикали, спутниковой системы определения координат и др. систем. На рис. 2.6 представлена структурная схема данного комплекса.

Вся получаемая информация обрабатывается по заранее заданным алгоритмам и воспроизводится на дисплее в виде, удобном для анализа и принятия окончательного решения оператором. В зависимости от имеющегося на борту судна типа орудий лова (кошелькового невода или трала) аппаратура имеет следующие режимы представления информации.

Для кошелькового лова: *Относительное движение (ОД).* Этот режим используется при поиске рыбных скоплений (косяков). В режиме ОД на экране дисплея отображается неподвижный символ судна, который размещается в нижней части на централь-

ной линии экрана. Расстояние от символа судна до границ экрана (боковых и верхней) соответствует рабочему диапазону гидролокатора. Гидроакустическая информация от гидролокатора воспроизводится в проекции оси акустического луча на горизонтальную плоскость, с которой совмещена плоскость экрана дисплея.

Истинное движение (ИД). Этот режим используется при поиске и в основном в фазе подготовки к облову обнаруженных рыбных скоплений. В режиме ИД на экране дисплея отображается символ судна, который перемещается по экрану в соответ-

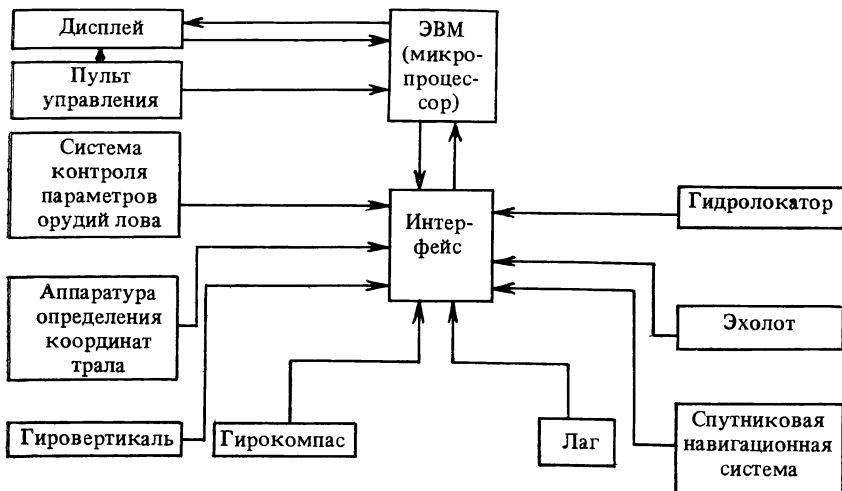


Рис. 2.6. Структурная схема комплекса гидроакустической судовой аппаратуры отображения промышленной ситуации лова.

ствии с его истинным перемещением в географических координатах и, следовательно, может занимать любое место на экране в зависимости от своей скорости и курса движения, и рыбные скопления. Кроме того, на экране высвечивается траектория движения судна за определенный промежуток времени, которая представляет собой линию, тянущуюся за символом судна.

Автоматическое сопровождение цели (АСЦ). Этот режим используется в заключительной фазе лова: выход в точку постановки кошелькового невода и обмет выбранного косяка и является частным случаем режима ИД, в котором происходит автоматическое сопровождение выбранного косяка. В режиме АСЦ управление поворотом и наклоном АС гидролокатора происходит с помощью ЭВМ, которая вырабатывает сигналы, управляющие ПВУ гидролокатора в соответствии с алгоритмами автоматического сопровождения цели.

При траловом лове: Вид сверху (ВСВ). Этот режим является основным при поиске рыбных скоплений. В режиме ВСВ на экране дисплея отображается информация относительного положения

судна, трала и рыбных скоплений, попавших в зону обзора гидролокатора, в проекции на горизонтальную плоскость. В этом режиме гидроакустическая информация, отображаемая на дисплее, поступает от гидролокатора.

Вид сзади (ВСЗ). Этот режим используется в стадии прицельного траления намеренного к облову косяка. В режиме ВСЗ на экране дисплея отображается информация относительного положения судна, трала и отмаркированных косяков в проекции на плоскость мидель—шпангоута. В этом режиме гидроакустическая информация, отображаемая на дисплее, поступает от гидролокатора и аппаратуры контроля параметров трала.

Вертикальный разрез (ВР). Этот режим используется для прицельного траления при прямолинейном движении судна. В режиме ВР на экране дисплея отображается информация относительного положения судна, трала, косяков, попавших в зону обзора эхолота, и дна в проекции на диаметрально плоскость судна. В этом режиме гидроакустическая информация поступает от эхолота.

Режим АСЦ здесь полностью соответствует аналогичному режиму при кошельковом лове.

Информация, воспроизводимая на экране дисплея в виде специальных символов, векторов и цифровых значений, отображает данные, необходимые для осуществления лова рыбы. Основными из них являются: скорости и направления движения судна и маркированных косяков с отображением их условного центра плотности; отстояния друг относительно друга судна, косяка и орудия лова; координаты положения судна и рыбных скоплений, рекомендованные курс и время для выхода судна на косяк; траектория движения судна; гидроакустическая информация системы контроля орудий лова и др. Кроме того, в этой аппаратуре имеется возможность заносить в электронную память информацию с большого массива площадей с последующим, через необходимый интервал времени, ее воспроизведением на экране дисплея.

§ 2.5. Требования к аппаратуре судов различного класса

В большой степени требования, предъявляемые к РПА, зависят от районов промысла и назначения рыбопромыслового судна. Районы промысла подразделяются на мелководные (до 500 м) и глубоководные (свыше 500 м). Промысловые суда делятся — на малотоннажные (от единиц до 300 т), среднетоннажные (до 1500 т) и крупнотоннажные (до 8000 т и более).

Малотоннажные суда активно используются на мелководье с глубинами от единиц до десятков метров. Традиционным в таких районах считалось использование эхолотов. Однако вертикальный режим работы гидроакустического прибора на малых глубинах имеет свои ограничения. Ширина зоны действия (объем, в котором может быть обнаружена рыба) на малых глубинах меньше, чем на больших при тех же углах ДН антенн [29]. Это

существенно ограничивает площадь, обследуемую за один галс, и кроме того ухудшает условия регистрации рыб при качке судна. Уменьшение размеров зоны обзора вдоль судна сокращает время нахождения в ней рыбы, т. е. ограничивает количество эхосигналов, что приводит к ухудшению регистрации их на самописце. Для получения необходимого количества эхосигналов, обеспечивающих надежную запись, приходится уменьшать скорость судна, т. е. снижать производительность поиска, или расширять ДН, что влечет за собой неоднозначность регистрации рыбы.

Поиск рыбы гидролокатором в таких районах до недавнего времени практически исключался, поскольку при горизонтальном зондировании грунт дает большое количество эхосигналов, и в сочетании с донной и поверхностной реверберациями их уровень имеет значительно большую интенсивность, чем эхосигналы от рыбы. Только при наличии плотных косяков рыбы и использовании прибора с очень узкой ДН допускался поиск по горизонту.

Ощутимое отрицательное влияние на работу РПА в мелководных районах оказывают дополнительные боковые лепестки ДН приборов. Интенсивная регистрация боковыми лепестками эхосигналов дна и поверхности акватории, повышенные реверберационные помехи в этих районах практически затрудняют использование РПА с большим уровнем дополнительных лепестков, в первую очередь гидролокаторов. Подавление же уровня боковых лепестков в малогабаритной аппаратуре известными в настоящее время способами практически не представляется возможным из-за значительного увеличения габаритов самой аппаратуры. Перспективным в этом плане представляется использование эффектов нелинейной акустики, позволяющей создать в приборах узкие ДН практически без дополнительных боковых лепестков при небольших размерах излучателей накачки без перехода на очень высокие частоты с сохранением необходимой дальности действия аппаратуры.

Известно, что мелководные морские районы более резко подвержены поверхностному возмущению, причем форма волн в этом случае более крутая, а частота их повторения выше, чем в открытых районах. Малотоннажные суда, использующиеся, как правило, для поиска рыбы на небольших глубинах, в большей степени подвержены качке, нежели крупные. Поэтому в РПА для мелководных районов обязательна стабилизация ДН.

Основные требования к РПА, размещаемой на малотоннажных судах, состоят в совокупности следующих качеств: простота в эксплуатации (аппаратуру эксплуатирует судоводитель), надежность и малогабаритность (часто переносная), высокое разрешение и наличие специальных поисковых режимов, целесообразность использования герметизированных ПВУ с бесшachtной установкой, использование стабилизированных ДН, малое энергопотребление.

В настоящее время в связи с биологическим обеднением шельфовых зон Мирового океана и выходом рыболовного промысла

в открытые районы океана с большими глубинами наметилась тенденция к резкому увеличению дальности действия гидроакустической РПА [39]. Поэтому крупнотоннажные рыбопромысловые суда и суда промысловой разведки оснащаются мощными рыбопоисковыми комплексами или несколькими типоразновидностями РПА. Один из вариантов современного вооружения гидроакустической РПА промыслового судна приведен на рис. 2.7.

Одним из наиболее эффективных способов увеличения дальности действия РПА является сужение ДН АС. В этом случае

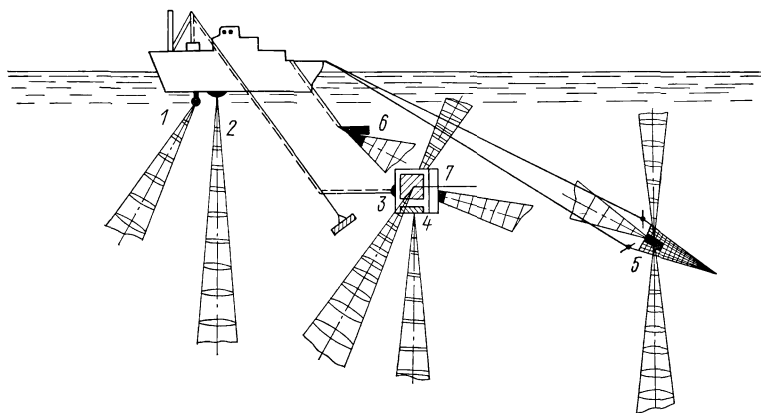


Рис. 2.7. Примерная схема современного вооружения гидроакустической РПА промыслового судна.

1 — подкильный гидролокатор; 2 — подкильный эхолот; 3 — буксируемый гидролокатор; 4 — буксируемый эхолот; 5 — подводный прибор системы контроля орудий лова; 6 — параван с приемной антенной системы контроля орудий лова; 7 — дополнительная приемная антенна системы контроля лова.

увеличивается коэффициент концентрации энергии, снижаются акустические помехи, и тем самым увеличивается разрешающая способность. Однако одновременно уменьшается сектор обзора водного пространства и увеличиваются линейные размеры АС. Районы Мирового океана с большими глубинами часто характеризуются значительными и резкими перепадами глубин, где, как правило, концентрируются рыбные скопления. Поиск и лов рыбы в этих районах также требуют наличия в РПА узких ДН. Узкие ДН антенн требуют их стабилизации в пространстве. Высокие требования по разрешающей способности — обнаружение одиночной рыбы на расстоянии 1—2 м от грунта на глубинах, превышающих 1000 м, — требуют введения в состав РПА специальных устройств «Белая линия», «Система дно», «Стробирование» и др., в большинстве которых используется явление значительного превышения (на порядок) интенсивности эхосигнала, отраженного от дна, по сравнению с интенсивностью эхосигнала, отраженного от рыбы. Перспективно использование режима параметрического излучения. Вся гидроакустическая РПА, находящаяся на борту

крупнотоннажных судов, работает комплексно, обеспечивая основную задачу промысла — высокую продуктивность лова в течение длительного периода (до 180 сут без подхода к берегу).

Основные требования к РПА этого подкласса: комплексированный состав аппаратуры; разновидность гидроакустической информации; обеспечение максимальных дальностей действия и одновременного широкого сектора обзора; наличие узких ДН АС аппаратуры с обязательной их стабилизацией в пространстве; наличие нескольких рабочих частот; высокая разрешающая способность; резервирование отдельных каналов или трактов в целом; повышенная информативность; высокая надежность. Все эти требования приводят к повышенным значениям массогабаритных параметров РПА для крупнотоннажных судов.

Среднетоннажные суда как по своему назначению, так и по промысловому вооружению, являются промежуточным звеном и оснащаются соответствующей РПА в зависимости от назначения судна.

§ 2.6. Аппаратура вспомогательного назначения

Гидроакустическая аппаратура, применяемая в рыбохозяйственных целях, объединяется общим названием — рыбопоисковая. Но ее функции не ограничиваются только поиском и обнаружением рыбных скоплений. Эта же аппаратура используется для навигационных целей, подсчета количества и видовой классификации рыбы, как тренажеры и др. Применение аппаратуры не по прямому своему назначению относят к подклассу вспомогательной (см. табл. 1).

В последние годы у нас в стране и за рубежом опубликована серия работ, направленных на выяснение возможности использования эхолотов и гидролокаторов не только для обнаружения рыбы, но и для определения ее количества в том или ином скоплении. Для этого в первую очередь необходимо знать отражательную способность различных отдельных промысловых рыб, образующих скопления, как объекта локации.

Чаще всего эта вспомогательная аппаратура называется эхоинтеграторами. Основное требование к ним — высокая точность интегрирования. Перспективно использование параметрических гидроакустических приборов для видовой классификации и количества рыбы.

Используется аппаратура — биостимуляторы, излучающая специальные гидроакустические сигналы, напоминающие звуки, издаваемые рыбой во время кормежки. Рыба в этом случае концентрируется вокруг аппаратуры в плотные, удобно облавливаемые косяки, или у новых мест, благоприятных для нереста, или у искусственных нерестилищ. Имеется аппаратура типа «Пастух», излучающая звуки, отпугивающие рыбу. Эта аппаратура устанавливается на замыкающихся кромках кошелька, чтобы рыба не

смогла выйти из него во время замета. Она также может быть использована при загоне рыбы и в другие снасти, для отпугивания от мест, не пригодных для нерестилищ и т.п. Главное требование к этой аппаратуре: в первом случае — подражание звукам определенной породы рыбы, а во втором — звукам врагов рыбы. Акустические звуки рыб при различном их состоянии и их врагов изучаются с помощью шумопеленгаторной аппаратуры.

Исследователи, наблюдающие за миграцией морских животных и рыбы с целью решения задач рациональности и регулирования рыболовства, применяют миниатюрные гидроакустические передатчики, закрепляемые на корпусе животного или рыбы. С помощью аппаратуры (шумопеленгаторов) прослеживается длительное перемещение биологических объектов из района в район.

Особое значение в рыбохозяйственных целях имеет гидроакустическая навигационная аппаратура, в задачи которой входит: точное определение глубины непосредственно под килем судна, скорости и сноса судна за счет ветра и подводных течений и предупреждение о возникающих препятствиях. Преимущественно эти задачи решаются эхолотами, имеющими минимальную мертвую зону и высокие рабочие частоты. Для определения скорости и сноса судна, а также для задач швартовки крупнотоннажных судов эхолоты работают на принципе эффекта Доплера. В последнее время навигационные эхолоты функционально включаются в состав РПА.

К вспомогательной аппаратуре также относится гидроакустическая контрольно-измерительная аппаратура, предназначенная для контроля работоспособности и измерения электроакустических параметров РПА. Основные требования к этой аппаратуре — высокая точность измерения проверяемых параметров.

Особое положение занимают тренажеры гидроакустической РПА, на которых учатся и приобретают навыки работы с аппаратурой гидроакустики и штурманский состав. Основные требования к этому типу аппаратуры — как можно реальнее имитировать информацию о промысловой обстановке, усложнять или упрощать ее, вводить аварийные ситуации, многократно возвращаться к повторению нужного эпизода и разучивать его по частям, контролировать процесс обучения и т.п.

Важное значение имеет вспомогательная аппаратура для воделазов и аквалангистов при ведении переговоров между собой (аппаратура связи), ориентации в водном пространстве и для отыскания объектов в воде и на грунте (прожекторные гидролокаторы). Основные требования к указанной аппаратуре — наименьшие возможные искажения, высокая точность определения направления, простота информационной индикации и малогабаритность.

Много разнообразной гидроакустической аппаратуры разрабатывается для научно-исследовательских рыбохозяйственных целей.

§ 2.7. Принципы построения и классификация параметрических гидроакустических приборов

Среди приборов активной локации выделился особый класс аппаратуры — гидроакустические приборы с параметрическими антеннами (ПА). В параметрических приборах активной локации используются излучающие ПА, для пассивной локации — приемные ПА. В РПА в последние годы появились параметрические приборы активной локации [21, 30, 32, 33, 59, 60, 92].

Появление нового класса гидроакустической РПА связано с особым набором положительных качеств излучающих ПА: отсутствием боковых лепестков в ДН, широкополосностью, постоянством ширины ДН и малыми габаритами первичных преобразователей.

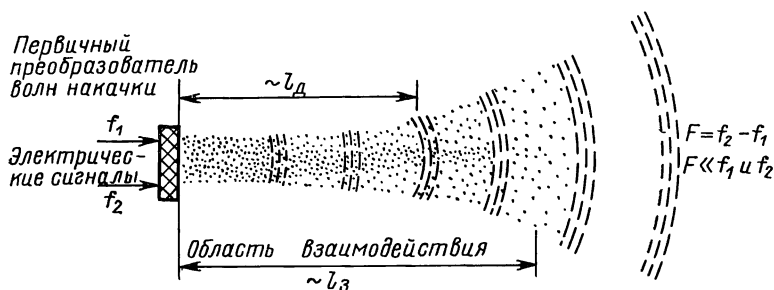


Рис. 2.8. Схема излучающей параметрической антенны.

зователей накачки. И хотя коэффициент преобразования энергии волн накачки в рабочую частоту ПА не превышает в оптимальных режимах 10 %, однако за счет концентрации всей энергии излучения в одном узком лепестке ДН нередко удается развивать уровни звукового давления, превышающие уровни традиционных линейных АС (особенно на низких частотах, например, на десятках герц) [24].

Схемы построения параметрических приборов имеют некоторые отличительные признаки, связанные с особенностями ПА. В простейшем случае ПА представляет собой (рис. 2.8) первичный преобразователь накачки и участок водной среды, протяженностью $l_3 = 1/\beta$, (где β — коэффициент затухания), в котором происходит взаимодействие волн накачки с близкими частотами f_1 и f_2 . Вследствие нелинейных свойств среды в области затухания и дифракции первичных волн накачки происходит нелинейный процесс генерации гармоник $2f_1$ и $2f_2$, а также волн суммарной $(f_1 + f_2)$ и разностной $F = f_1 - f_2$ частот. В силу степенной зависимости затухания волны с частотами $f_1, f_2, 2f_1, 2f_2, f_1 + f_2$ быстро затухают, а волны разностной частоты (ВРЧ) распространяются на значительные расстояния.

Использование в ПА нелинейного взаимодействия звуковых волн при их распространении в воде позволяет разделить в пространстве процессы преобразования электрической энергии

в акустическую и формирования направленного излучения. В силу этого ПА обладают свойством широкополосности. Соотношение между частотами f_1 и f_2 и их плавную перестройку можно варьировать в широких пределах. Перекрытие по частоте может достигать в одном параметрическом приборе $F_{\text{верх}}/F_{\text{нижн}} \approx 100$ и более. Функцию устройства, формирующего узкую безлепестковую ДН, в ПА выполняет протяженный (длиной в десятки и даже сотни метров) объем среды, в котором взаимодействуют волны. Поэтому ПА является «бестелесной», а среда в ней играет самую активную роль в формировании ДН. Частоты накачки f_1 и f_2 обычно много больше F_- (см. рис. 2.8), поэтому АС параметрических приборов имеет существенно меньшие габариты и массу по сравнению с традиционными АС при одной и той же рабочей частоте. Физика процессов, происходящих в ПА, подробно рассмотрена в [60]. Свойства ПА и расчет их характеристик для РПА приведены в § 7.8.

Безлепестковость ПА, их широкополосность, уменьшение габаритов АС и определенные требования к схемам формирования сигналов накачки привели к расширению функций и возможностей, но одновременно и к появлению конструктивных особенностей параметрической РПА.

Общая схема построения параметрических приборов активной гидролокации не отличается от соответствующих описаний предыдущих параграфов. В параметрических приборах изменяются функции и конструкции АС, блоков формирования сигналов накачки и блоков приема и обработки информации (в случае широкополосных параметрических систем), особенности конструирования которых рассмотрены в гл. 7 и 11.

Опыт конструирования и эксплуатации гидроакустической аппаратуры с ПА, а также анализ публикаций позволяют провести ее классификацию. Эти признаки классификации во многом сходны с рассмотренными в предыдущих параграфах. Существенно новым классификационным признаком приборов является частотный состав излучаемых ПА сигналов. Он во многом определяет назначение, функциональную связь блоков, элементов и конструкций параметрической аппаратуры. По частотному признаку параметрические приборы можно разделить на моночастотные, многочастотные, со сложными сигналами и с сигналами самодетектирования (см. табл. 1).

В моночастотных и многочастотных параметрических приборах излучение ПА производится на одной (возможно плавно перестраиваемой) или последовательно нескольких частотах в пределах полосы пропускания преобразователей накачки. В этих приборах в основном используется два положительных качества ПА — узкая ДН и отсутствие в ней боковых лепестков.

Типичными представителями аппаратуры обсуждаемого подкласса являются отечественный малогабаритный рыбопоисковый прибор «Пескарь» (эхолот + гидролокатор) с параметрическим трактом излучения для работы на мелководье [30] и параметри-

ческий эхолот фирмы «Кгирр» (ФРГ) марки Paso-30 с перестраиваемой частотой. Моночастотные и многочастотные параметрические приборы имеют много общих конструктивных особенностей. Особо следует отметить полезность измерительных параметрических излучателей типа НАИ [60] для градуировки и контроля работоспособности АС и преобразователей. В отдельный подкласс следует выделить параметрические приборы с широкополосными сложными сигналами, используемые для повышения информационной емкости передачи и приема гидроакустических сигналов. Приборы данного подкласса используют свойство ПА излучать узким безлепестковым лучом широкополосные сигналы (сигналы с большой базой) с фазовой и амплитудной модуляцией и манипуляцией. При этом функциональные возможности гидроакустической аппаратуры существенно расширяются. В настоящее время эксплуатируются исследовательские параметрические гидроакустические приборы типа ПГЛ-5 и ПГЛ-5М [14], а также подводный буксируемый аппарат типа НГА-1 с четырьмя параметрическими гидролокаторами [15], в которых применена внутриимпульсная линейно-частотная (ЛЧМ) и параболическая модуляции.

Сложные широкополосные сигналы в сочетании с частотно-независимой ДН ПА используются для решения классификационных задач и излучения коротких импульсов. Широкополосные сигналы, в частности, свипирование частоты в течение импульса (ЛЧМ-сигналы) позволяют получать дополнительную информацию путем анализа частотной зависимости от цели сигнала, повышают отношение сигнал/помеха при обработке отраженного импульса и др. Использование коротких импульсов повышает разрешение по лучу и уменьшает мертвую зону РПА.

Перспективным является подкласс параметрических приборов с самодетектированием. Он впервые успешно внедрен в серийном рыбопоисковом эхолоте «Сарган-ЭМ» [21]. Принципы технической реализации этих приборов наглядно видны из основной физической модели явления самодетектирования [28, 60]. При распространении, например, в водной среде одиночных и периодических акустических импульсов с функцией огибающей $f(\Omega t)$ с высокочастотным заполнением и без него происходит нелинейное взаимодействие (т. е. формируется ПА) спектральных составляющих. Важно отметить, что в импульсе частотные составляющие являются фазосвязанными, поэтому процесс переноса части энергии импульсов в область разностных и суммарных частот (последние быстро затухают) происходит довольно эффективно. Возникает явление самодетектирования (или самодемодуляции) импульсов [28, 60]. ПА в режиме самодетектирования излучает широкополосный сигнал, сохраняя свои положительные качества безлепестковости, постоянства ширины ДН в полосе, малые размеры первичного излучателя на рабочей частоте и др.

Вся РПА активной гидролокации практически работает в импульсном режиме. Поэтому в водной среде около акустических

Таблица 2. Основные технические параметры наиболее распространенной отечественной и зарубежной РПА

Страна, фирма	Марки (названия) приборов	Рабочая частота, кГц	Диаграмма направленности, град	Дальность (максимальный диапазон), м	Виды индикации	Тип антенны	Методы обзора акваторий	Отличительные особенности
Гидролокаторы								
СССР	Прибой-101	19,7	$14 \times 9/18$	3000	Регистратор, электронный индикатор, громкоговоритель	Прямоугольная. Магнитострикционная	Электромеханическое сканирование по горизонту 360°, по вертикали от 0 до 90°	Двухчастотная антенна
	Сарган-Г	20, 135	14×14 4×4	1500 500		Плоская, круглая, пьезокерамическая		
	Таймень	20	$7,2 \times 7,2$	3500	Регистратор, электронный индикатор со спиральной разверткой, громкоговоритель, цифровая индикация	Плоская многоэлементная пьезокерамическая	По горизонту одновременно сектор 90° с разворотом на $\pm 175^\circ$, по вертикали от —5 до 90°	Цифровая первичная и вторичная обработки эхосигналов. Компенсация эффекта Доплера. Стабилизация ДН. Гибкий обтекатель
	Таймень-С	35	$7,2 \times 7,2$	2000			Одновременный круговой обзор с плавным электронным наклоном до 55°	Немигающее изображение, схема адаптивного порога
	Угорь	30	10×12	1300		Цилиндрическая пьезокерамическая		Параметрический режим
	Пескарь	50	В излучении 6×6 , в приеме 45×45	100	Регистратор, электронный индикатор	Пьезокерамика	Ручное управление приводом антенны	
Канада, C-Tech	LSS-30PET	30	10	(4000)	Электронный индикатор со спиральной разверткой	Многоэлементная цилиндрическая из пьезокерамики	Электронное сканирование в секторе 360°; элек-	

Япония, Furuno	Spectra Scan 3000	36	10×9	(4000)	коп; громкогов- оритель Электронный ин- дикатор с цвет- ной ЭЛТ; громко- говоритель	зокерамики	тронный наклон от 0 до 45° Электронное ска- нирование в сек- торе 360°; элек- тронный наклон от -3 до +60° Электронное ска- нирование в сек- торе 360°; элек- тронный наклон от 0 до 45°	Возможность ав- томатического сканирования в вертикальной плоскости
	Seamate CDS-40	38	16×15	(2000)	Электронный ин- дикатор с цветной ЭЛТ; громкогово- оритель			
	FH-105	150	6	(1000)	Электронный ин- дикатор с линей- ной поворачиваю- щейся разверткой, громкоговоритель	Пьезокерами- ческая	Автоматический или ручной, меха- нический разворот антенны	Стабилизация ан- тенны в двух пло- скостях; режим АСЦ
	FH-106	60	14	(1600)	Электронный ин- дикатор с запоми- нающим устройст- вом; громкогово- оритель		Автоматический или ручной, меха- нический разворот антенны; механи- ческий наклон от 0 до 90°	
	FSS-32B	32	14×16	(2800)	Электронный ин- дикатор со спи- ральной разверт- кой; громкогово- оритель	Многоэлемент- ная цилиндри- ческая из пье- зокерамики	Электронное ска- нирование в сек- торе 360°; элек- тронный наклон от 0 до 55°	Возможность сме- щения центра раз- вертки в элек- тронном индика- торе
	FSS-75B	75	10	(1400)	Электронный ин- дикатор со спи- ральной разверт- кой		Электронное ска- нирование в сек- торе 180°; механи- ческий разворот на $\pm 170^\circ$ и наклон от 0 до 90°	

Страна, фирма	Марки (названия) приборов	Рабочая частота, кГц	Диаграмма направленности, град	Дальность (максимальный диапазон), м	Виды индикации	Тип антенны	Методы обзора акватории	Отличительные особенности
Япония, Furuno	CS-30	28; 32; 40 или 45		(2800)	Электронный дисплей с цветной ЭЛТ; громкоговоритель	Многоэлементная цилиндрическая из пьезокерамики	Электронное сканирование в секторе 360°; электронный наклон от 0 до 55°	Отображение гидроакустической информации в режимах истинного и относительного движения; индикация параметров целей и данных от сопрягаемых приборов на экране дисплея
	CS-50	45 или 60		(2800)	Электронный дисплей с цветной ЭЛТ; громкоговоритель	Многоэлементная цилиндрическая из пьезокерамики	Электронное сканирование в секторе 360°; электронный наклон от 0 до 60°	Отображение гидроакустической информации в режимах истинного и относительного движения; индикация параметров целей и данных от сопрягаемых приборов на экране дисплея
	CS-70	75 или 88		(1400)			Электронное сканирование в секторе 180°; меха-	

Норвегия, Simrad	CH-12	60 80 120	6×10 $6 \times 8,4$ $6 \times 4,5$	300 240 150	Электронный дис- плей с цветной ЭЛТ		Электронный разво- рот на $\pm 170^\circ$ и наклон от 0 до 90° Сочетание элект- ронного сканиро- вания в секторе 30° и шагового механического в пределах 360° , механический на- клон от -5° до $+90^\circ$	Использование за- поминающих уст- ройств для форми- рования кругового изображения при механическом ска- нировании узкого сектора одновре- менного обзора
	ST	21	13×11	(3500)	Регистратор; громкоговоритель	Магнитострик- тор	Электромеханиче- ский разворот ан- тенны на 360° и наклон от -5° до $+90^\circ$	Гибкий обтекатель
	SM600	34	9×7	2000	Электронный дис- плей с цветной ЭЛТ; громкогово- ритель	Плоская с пре- образовате- лями из пье- зокерамики	Электронное ска- нирование в сек- торе 85° ; электро- механический раз- ворот и наклон от -15° до $+105^\circ$	Компенсация эф- фекта Доплера; гибкий обтекатель
	SX200	57	11	1000— 1300	То же	Сферическая антенна	Электронное ска- нирование в сек- торе 360° или 180° в горизонтальной плоскости и в сек- торе 180° в верти- кальной плоскости	Автоматический или ручной элект- ронный наклон горизонтального сектора и разво- рот вертикального сектора

Страна, фирма	Марка (название) прибора	Рабочая частота, кГц	Диаграмма направленности, град	Дальность (максимальный диапазон), м	Виды индикации	Тип антенны	Методы обзора акватории	Отличительные особенности
Норвегия Simrad	Skipper S109	180	10	(500)	Электронный индикатор	Плоская пьезокерамическая	Электромеханический разворот в заданных секторах до 360° и наклон от +15° до 90°	Электромеханическая стабилизация антенны в пространстве
ФРГ, Krupp	Atlas Fishing Sonar 950	19,5	9 × 14	(4000)	Электронный индикатор с черно-белой телевизионной ЭЛТ	Многоэлементная пьезокерамическая	Электронное сканирование в секторе 90, 70, или 56°, электромеханический разворот от 155° ЛБ до 185° ПБ и наклон от -5 до +120°	Одновременное изображение целей в горизонтальной и вертикальной плоскостях; повышенная точность отсчета угловых положений цели (использование интерполяционного фильтра)
Эхолоты								
СССР	Прибой-101	25,5	5 × 10, 10 × 10	1200	Регистратор, электронный индикатор	Прямоугольная магнитострикционная		

Сарган-ЭМ	20 135	10×10 15×15 4×4 12×12	1000 300	Регистратор, электронный индикатор, цифровая индикация	Плоская пьезокерамическая	Система ДНО, режим Лула	Двухчастотная антенна. Навигационный режим. Режим параметрического самодетектирования
Таймень	15 50	$7,2 \times 7,2$ 10×10	2000 300	Регистратор, электронный индикатор, цифровая индикация	Многоэлементная плоская пьезокерамическая	Электронная стабилизация луча по бортовой качке, отклонение луча на $\pm 15^\circ$. Система привязки к грунту	Цифровая первичная и вторичная обработка эхосигналов. Немелькающее изображение на экране ЭЛТ
Таймень-С	24 50	$7,2 \times 7,2$ 10×10	800 300	Приборы индикации подсоединяемой аппаратуры	Пьезокерамическая		Букурируемый эхолот с преобразованием частоты в приемном тракте
Плавник	25,5	5×10 , 5×5	2000	Регистратор, электронный индикатор	То же		Две антенны, параметрический режим, различные поставки
Пескарь	50	45×45 10×16	100 250	Регистратор	”		Переносной
Язь	85	45	30	Регистратор	Пьезокерамическая		Многократное использование бумажки. F-90W имеет 6 модификаций, FG-200-4.
Япония, Fujiro	200	15	(120)	Регистратор	То же		
F-90W	200	10	(150)	Регистратор, световой отметчик			
FG-200 Mark-3	200						

Страна, фирма	Марки (название) приборов	Рабочая частота, кГц	Диаграмма направления, град	Дальность (максимальный диапазон), м	Виды индикации	Тип антенны	Методы осмотра акватории	Отличительные особенности
Япония, Furuno	F-860 Mark II	50 и 500	28 7	(500)	Регистратор	Пьезокерамика		Каждый имеет от 3 до 5 модификаций
	FG-II Mark-3	50	28	(500)	Регистратор, световой отметчик	То же		Многократное использование бумаги
	FM-21, FM-22	50 и 200	42 × 28 7 × 5	(800)	Регистратор	" "		
	FUG-400	50 и 200	12	(200)	Регистратор, электронный отметчик	Пьезокерамика, обтекатель типа «Утюг»	Донная блокировка	Двухчастотный
	FTG-212, FTG-412	28 и 200; 50; 28 и 200	14 × 14/7 14 × 8/5	(800)		Ферритовые		Двухчастотные по 3 модификации
	FNV-750, 450F, 1500, 3000, 5000, 28 и 2500F, 2000T	50 и 200; 28 и 200	20 и 7, 4 11, 4 × 19	(800)	Регистратор, электронный индикатор	50 и 200 — пьезокерамика; 28 — феррит	Режим «лупа»	Двухчастотные
	F-851D, 860, 861, 862, 863	50 или 200	28 × 15	(240)	Регистратор	Пьезокерамика	То же	Устанавливаются на малых судах
	FE-400, 501, 502	50 или 200	28 × 15 5	(160)	То же	То же		
	FE-600	50 и 200	50 10	(320)	" "	" "		Имеет 2 модификации

FE-808, 813, 814, 824	15 28 50 60 88 200	31×78 28 22 12 10 5,4	(600)	Регистратор	15 и 28 — фер- рит; 50, 60, 88 и 200 — пьезо- керамика	Режим «лупа»	Имеются от 2 до 5 модификаций, сменные генерато- ры
FUV/FUG- 11, 12, 13, 22, 23	15/ 200 28/ 200 50/ 200 28/ 50	$14 \times 14/8$ $14 \times 13/$ 5,4 $16 \times 9,6/8$	(600)	Регистратор, элек- тронный отсчетчик	15, 28 и 50 — феррит; 200 — пьезокерамика		Двухчастотные, сменные генерато- ры
FWGT-22, 23, 42, 43	28 и 50	14, 8 и 6; $16 \times 9,6$	(800)	Регистратор, бу- мага химическая	Феррит		Работают с сеге- выми зондами, сменные генерато- ры
FNG-750, 750S, 450F, 450FS, 1500, 1500S, 3000, 3000S, 2500FS	50 или 28 или 3000S, 200	7 14×8 5	(1000)	Регистратор	28 и 50 — фер- рит, 200 — пье- зокерамика		Совмещенная за- пись двух и более диапазонов
TU-48, TL-32, TS TL-16, TS	28 и 200	14×8 5	(1000)	Регистратор, элек- тронный отсчетчик	28 — феррит, 200 — пьезоке- рамика	Расширитель диа- пазонов	Для оснащения средних и боль- ших судов
FCV-201S/ 201ST	200	8,5 5,4	(320)	Цветной индика- тор телевизион- ного типа	Пьезокерамика		
FCV-121/ 121B	28 50 200	30×34 12×28 5; 4; 8; 6	(1280)	То же	28 и 50 — фер- рит; 50 и 200 — пьезоке- рамика		Имеют сопряже- ние с навигацион- ными системами и сетевыми зонадами

Страна, фирма	Марка (название) прибора	Рабочая частота, кГц	Диаграмма направленности, град	Дальность (максимальный диапазон), м	Виды индикации	Тип антенны	Методы обзора акватории	Отличительные особенности
Япония, Futuro	FE-881	28 50 88 200	30 × 34 22 × 28 14 × 28 12; 15; 5,4	(500)	Регистратор	28 и 50 — феррит; 50, 88 и 200 — пьезо-керамика	Расширенный при-донный слой	
Япония, Kodan	SR-680, SRM-681, 871	50 или 28 или 200	19 × 17; 29 × 23; 7,6	(300)	Многоперьевой регистратор			Для оснащения малых и средних судов, имеют по 4—7 модификаций, двухчастотные
	CVS-881, 882, 883, 885	14; 28; 50; 75; 200;	15—25	(1000)	Восьмицветный телевизионный индикатор		Расширитель про-смаатриваемых диапазонов	По несколько модификаций по две частоты, первые эхолоты с цветными индикаторами
	SRM-872, 873	200/ 28 50/28	6 29 × 23 19 × 17	(600)	Электронный индикатор			Двухчастотные, каждая модель имеет по 2 модификации
	SR-654, 656, 658, 660	28; 50; 75; 200	15; 45; 40	(100)	Регистратор			Для малых и средних судов, имеет-ся по 4 модификации
	SR-385; 396	75; 28 или 200		(1000)	Регистратор, электронный отметчик		Расширитель диапазонов	Для крупных судов

ФРГ, Krupp	Atlas Fischer-791DS	33	6 × 8, 6 × 4	1000	Регистратор, электронный индикатор	Многоэлементная пьезокерамическая	Стабилизация луча по бортовой качке	Использование об-работки типа DIMUS
Норвегия, Simrad	EK-400	12; 18; 27; 38; 48; 120	12 × 17; 14 × 14; 10; 4	(4000)	Регистратор	12, 18, 38 и 49 — никелевые; 38, 49, 120 и 200 — пьезокерамические	Расширитель диапазонов	Цифровая запись на бумаге, управление режимами с помощью клавиатуры, двухчастотные
	EK-120 EQ38, 50	120 38, 49	4, 10	(500) 700, 460	Регистратор	Пьезокерамика		
	EY-M	70	27, 11	(120)		Пьезокерамика, обтекатель типа «Утюг»		Два преобразователя, для количественной оценки
	ET-100	12 18 27 38 49 120 200	22 × 17 14 8/22 (13) 38 × 8 (9/23) 49 × 18 10 (4)	820 920 1100 520 (600)	Регистратор	Никель и пьезокерамика	Расширитель диапазонов	Для средних и крупных судов
	CS-108	38, 50, 200			Цветной индикатор телевизионного типа			

преобразователей всех приборов указанного класса формируется ПА с широкополосным сигналом самодетектирования. В практическом использовании свойств ПА в режиме самодетектирования сделаны только первые шаги.

Назначение в области использования гидроакустических приборов с ПА в режиме самодетектирования те же, что и предыдущих подклассов.

Основные технические параметры наиболее распространенной отечественной и зарубежной РПА приведены в табл. 2.

Глава 3

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИЯ РПА

§ 3.1. Критерии эффективности

Время поиска на промысле рыбы существенно сказывается на конечных результатах улова рыбопромыслового судна. На сегодняшний день оно достигает значительных величин. Так на траловом промысле время поиска составляет 5—20 % календарного времени года, а на кошельковом лове — 50—60 % [74]. Поэтому вопросы организации промысла, техники промышленного рыболовства, прогнозирования сырьевой базы и т. п. тесно связаны с проектированием РПА, с выбором основных ее параметров и характеристик. РПА в современных условиях промысла оказывает непосредственное влияние на производительность рыбопромыслового судна. Существуют определенные количественные выражения этого влияния.

Наиболее общим является подход, при котором определяется некоторый признак — *показатель качества*, характеризующий данный вариант РПА, и *правило предпочтения*, по которому системе с данным значением показателя качества отдается предпочтение перед другой системой [9]. В совокупности задание показателя качества и правила предпочтения образует *критерий выбора системы*. Например, при показателе качества — дальности действия — критерием является максимум дальности обнаружения рыбы, при показателе качества — стоимости — критерием служит минимум стоимости и т. д. Выработка критерия представляет собой первый шаг в процессе проектирования и производится на основе анализа поставленной задачи.

При оценке различных организационно-технических мероприятий как критерий успешности функционирования РПА широко используется понятие «эффективность». Под эффективностью в общем случае понимается способность аппаратуры в течение заданного времени создавать полезный выходной эффект, который можно охарактеризовать теми или иными показателями. Коли-

чественная оценка эффективности РПА необходима для установления степени соответствия своему назначению уже находящейся в эксплуатации РПА. Еще важнее она на стадии проектирования, когда до создания РПА можно количественно оценить ожидаемый полезный эффект и его взаимосвязь с эксплуатационно-техническими параметрами аппаратуры.

Одним из первых шагов при решении задачи, связанной с количественной оценкой эффективности РПА, является определение вида показателя, который мог бы служить мерой эффективности. Он должен быть выбран и логически обоснован с учетом специфики работы аппаратуры, так как оценка эффективности по различным критериям в общем случае приводит к различным результатам. Общеизвестны следующие требования к показателю, который мог бы служить мерой эффективности [1, 75]:

- показатель должен отражать основное назначение аппаратуры и соответствовать цели проводимого испытания;

- показатель должен быть критичен по отношению к параметрам, определяющим его значение;

- показатель должен быть наглядным и по возможности легко определяться.

Прежде чем выбрать критерий эффективности следует условиться, какую аппаратуру вообще можно принять за эффективную. Эффективной следует считать РПА, удовлетворяющую требованиям:

- полное и в установленные сроки выполнение в соответствующих условиях стоящих перед ней задач. Степень соответствия аппаратуры этому требованию принято называть *технической* или *поисковой эффективностью*;

- результаты использования аппаратуры по назначению не меньше затрат на ее создание и обслуживание в процессе эксплуатации. Степень соответствия аппаратуры данному требованию называют *экономической эффективностью*.

Как известно [75], эффективность любых средств определяется: назначением N — результатом применения средств в случае, когда стоящие перед ними задачи выполняются в полном объеме; фактическим результатом R применения средств по назначению и затратами z на их создание и эксплуатацию. Совершенно очевидно, что эффективность средства, имеющего определенное назначение, будет тем выше, чем больше результат применения и меньше затраты на его создание и эксплуатацию. В качестве критерия эффективности E принимают

$$E = (R - z)/N. \quad (3.1)$$

Этот критерий, применимый как для оценки эффективности уже эксплуатируемой РПА, так и для оценки эффективности вновь проектируемой, характеризует, в какой степени эффективность аппаратуры отличается от предельно возможной, когда $R=N$ и $z=0$. Основной недостаток критерия (3.1) заключается в том, что он не удовлетворяет требованию наглядности, а применение его

осложняется еще и необходимостью выражения величин R и N в стоимостном виде.

На практике обычно нет необходимости оценивать абсолютную эффективность, а достаточно сравнивать эффективность РПА одного класса или эффективность одной и той же РПА в различных условиях использования. Тогда в качестве критерия технической эффективности E_T можно принять функцию

$$E_T = E(R, N), \quad (3.2)$$

а в качестве критерия экономической эффективности

$$E_э = E(R, z). \quad (3.3)$$

Очевидно, что критерий технической эффективности представляет собой итоги сравнения назначения аппаратуры N и фактического результата R ее использования, а критерий экономической эффективности — итоги сравнения фактического результата применения R и затрат Z на создание и эксплуатацию. Выражения (3.2) и (3.3) в более явном виде можно представить по разному

$$E_T = N - R; \quad (3.4)$$

$$E_T = R/N; \quad (3.5)$$

$$E_э = z - R; \quad (3.6)$$

$$E_э = R/z. \quad (3.7)$$

Из анализа (3.4)—(3.7) следует, что критерии вида (3.5) и (3.7) предпочтительнее, поскольку здесь не требуется выражать R или N в стоимостном виде и, кроме того, возможно использование не только сложных показателей R или N , но и их составных частей.

Следует отметить, что обобщенный критерий (3.7) имеет слабые стороны, так как в нем возможна компенсация отрицательных свойств одного показателя положительными свойствами другого показателя [75]. Например, высокий результат R использования РПА может компенсироваться малой ее стоимостью z , что на величине обобщенного показателя $E_э$ не отразится. Однако учитывая реальное положение вещей при создании современных средств поиска, маловероятно встретиться с РПА одного класса с очень малой стоимостью z , но зато и очень низким показателем R , делающим ее практически непригодной для использования на промысле. Такие случаи при современном состоянии развития РПА практически исключаются: вся современная РПА одного класса сравнима по стоимости и справляется с поставленными перед ней задачами. Так что с учетом высказанных соображений критерий (3.7) как обобщенный критерий будет объективно отражать преимущества и недостатки рыбопоисковых средств.

Работ, непосредственно касающихся количественной оценки эффективности РПА, относительно мало [16, 52, 74, 75]. До настоящего времени еще нет однозначного общепризнанного критерия

использования РПА на промысле. Одни авторы принимают за него увеличение просматриваемого объема водной среды, а другие — увеличение прилова рыбы только за счет РПА на основе обработки статистических данных уловов по однотипным судам за несколько лет.

В первом случае подсчет ведется проще. Но в новых, последних, разработках РПА одним из основных требований выдвигается требование увеличения ее дальности действия, что достигается увеличением размеров АС и сужением ДН. Зачастую эти требования находятся в противоречии с критерием эффективности по увеличению просматриваемого объема водной среды. В данном случае коэффициенты значимости увеличения объема должны быть разными для эхолота и гидролокатора (для эхолота значительно больше). Снижение эффективности из-за уменьшения дальности действия гидролокатора можно компенсировать увеличением времени поиска, скорости судна, или, в крайнем случае, количества поисковых судов. Приращение эффективности вследствие увеличения же дальности действия эхолота практически компенсировать нечем, так как слой водной среды, расположенный ниже зоны действия конкретного эхолота, просмотреть невозможно без применения нового более современного эхолота.

Во втором случае [52, 75] чаще всего опираются на практику лова, теоретический расчет увеличения улова рыбы за счет РПА провести трудно. Оценивать возможность использования вновь разработанной РПА или эксплуатируемой РПА по увеличению прилова в новых ситуациях, отличных от проектных, или практически не представляется возможным, или на первых стадиях эксплуатации не получается положительного эффекта, что отрицательно воспринимается эксплуатационниками. Увеличение прилова больше констатирует факт той или иной эффективности эксплуатируемой РПА, чем прогнозирует эту эффективность. Одним из критериев обсуждаемой методики является критерий надежности аппаратуры [52]. В результате этого нивелируется количественная эффективность различной по возможностям РПА, так как надежность современной РПА различных классов и типов довольно высокая и приблизительно одинаковая. В конечном итоге методика оценки эффективности РПА по увеличению прилова не вскрывает явных причинно-следственных связей эффективности с основными эксплуатационно-техническими и стоимостными параметрами РПА и поэтому не используется разработчиками аппаратуры.

Представляет интерес методика оценки эффективности РПА, учитывающая главное назначение РПА — обнаружение объектов промысла, и принимающая в качестве основного критерия эффективности — вероятностный критерий, показателем которого является вероятность обнаружения к заданному сроку [1]. В силу того, что на результаты поиска влияет большая группа факторов, носящих случайный характер, сам результат поиска также следует рассматривать, как явление случайное, количественно харак-

теризуемое ожидаемой вероятностью его свершения. Таким образом, за главный критерий поисковой эффективности РПА можно принять *вероятностный критерий*, показателем которого служит вероятность обнаружения объекта к заданному сроку или математическое ожидание времени, необходимого для обнаружения объекта с заданной вероятностью. Вероятность обнаружения объекта $P_{об}(t)$ к заданному сроку t зависит от случайных причин: вероятности встречи $P_в$ с объектом, т. е. от вероятности попадания объекта в зону действия РПА; вероятности установления акустического контакта $P_а$ с попавшим в зону действия РПА объектом и вероятности $P_и$ исправной работы РПА. В свою очередь $P_а$ определяется вероятностью геометрического контакта $P_{г.к}$, т. е. вероятностью попадания объекта в зону облучения РПА, и вероятностью энергетического контакта $P_{э.к}$, т. е. вероятностью правильной классификации сигнала от объекта на фоне неизбежно присутствующих помех $P_{ак} = P_{г.к} P_{э.к}$. Вероятность $P_{э.к}$ связана с методами приема, обработки и воспроизведения гидроакустической информации об объекте, а вероятность $P_{г.к}$ зависит от способа обзора водного пространства, технических параметров АС, состояния морской среды и других факторов.

Так как все перечисленные причины — попадание объекта в зону действия РПА, установление с объектом акустического контакта, безотказная работа РПА — суть события случайные и независимые, то для нахождения вероятности обнаружения объекта можно воспользоваться теоремой об умножении вероятностей. Тогда для $P_{об}(t)$ — основного показателя поисковой (технической) эффективности РПА можно записать

$$P_{об}(t) = P_в P_{ак} P_и = P_в P_{г.к} P_и P_{э.к}. \quad (3.8)$$

Основной показатель поисковой эффективности РПА (3.8) является объективным показателем, отражает основное ее назначение, поддается аналитическому определению, применим к оценке эффективности как эксплуатируемой, так и проектируемой РПА, т. е. удовлетворяет основным требованиям к критериям эффективности, изложенным выше. Этот показатель эффективности есть не что иное, как упомянутый выше показатель технической эффективности E_T (3.5), поскольку величину $P_{об}(t)$ следует рассматривать как результат R применения РПА, а величина N — назначение РПА (идеальное исполнение задачи) должна приниматься за единицу, так как при идеальном обнаружении $P_{об}(t) = N = 1$. Показатель технической эффективности $E_T = P_{об}(t)$ по (3.8) связан с основными эксплуатационными и техническими характеристиками РПА, и, следовательно, он может влиять на их выбор при ее проектировании.

Необходимо отметить, что существующие на сегодняшний день показатели эффективности РПА не учитывают всех поисковых ее качеств. Они не отражают важные конструктивные особенности РПА, влияющие на такие эксплуатационные параметры как разрешающая способность, количество и качество гидроакустической

информации, удобство представления ее, дополнительные режимы, облегчающие работу оператора, виды и качество обработки принимаемых сигналов, степень привязанности оператора к РПА в процессе использования и т. п. Эти необоснованные преимущества РПА следует оценивать дополнительными показателями эффективности, в отношении которых необходимо, чтобы они находились в определенных пределах. Тогда если какой-либо дополнительный показатель эффективности выходит за определенные пределы, то РПА следует считать малоэффективной, несмотря на высокий основной показатель. И, наоборот, если дополнительные показатели не выходят за определенные пределы, то наиболее эффективной должна считаться РПА, обладающая наивысшим основным показателем.

§ 3.2. Зависимость выходного эффекта РПА от оптимальности ее структурной схемы

Теория оптимизации проектирования дает возможность с помощью числовых значений целевых функций сравнить несколько предлагаемых вариантов РПА и выбрать из них наиболее оптимальный.

Современная РПА представляет собой типичный пример сложной системы, содержащей большое число элементов с определенной иерархичностью построения и большими внутренними потоками информации. Оптимальное проектирование таких систем заключается в достижении максимального выходного эффекта при определенных ограниченных средствах, находящихся в распоряжении разработчика [9]. Возможна и другая постановка задачи: достижение определенного конкретного уровня выходного эффекта при минимальных затратах.

После введения показателя качества задача оптимизации сводится к поиску его экстремума. Аналитическое выражение такого показателя качества обычно называют *целевой функцией*. Какие-либо общепризнанные целевые функции проектирования РПА до сих пор отсутствуют, хотя необходимость их точного определения очевидна. Целевая функция должна быть математически достаточно простой, отражать физическую суть явления и основные логические связи, используемые при проектировании РПА. Рассмотрим целевую функцию, предложенную в [16]. Здесь предлагается только один из возможных видов целевой функции проектирования РПА при обобщенном показателе качества системы типа «эффективность — стоимость». Он не претендует на преимущества перед другими критериями или на некую универсальность при проектировании сложной РПА. Предлагаемая целевая функция $F_{ц}$ называется энергетической и может быть представлена в следующем виде:

$$F_{ц} = \mathfrak{A} \left(\frac{\delta_n}{\delta_n} \right) \eta_a H \gamma / V C_c C_6, \quad (3.9)$$

где \mathcal{E} — акустическая энергия, излучаемая РПА в определенном направлении за один цикл работы; η_a — электроакустический КПД антенны; H — критерий надежности; γ — гибкость системы (способность работать в различных условиях и обеспечивать разные режимы работы); V — объем аппаратуры; C_c — сложность структуры; C_b — суммарная сложность блоков аппаратуры; δ_n — отношение сигнал/шум на выходе приемного тракта (на индикаторе); δ_n — отношение сигнал/шум на входе приемного тракта при коэффициенте концентрации в режиме приема $\gamma_{пр}=1$.

Фактически целевая функция (3.9) представляет собой отношение выходного эффекта к затратам на его реализацию, так как по объему и сложности аппаратуры легко определить затраты на ее проектирование, изготовление и эксплуатацию.

Так как энергетический потенциал РПА обратно пропорционален логарифму вероятности обнаружения эхосигнала, то логично ввести в энергетическую целевую функцию аналогичную зависимость для вероятности нахождения аппаратуры в исправном состоянии:

$$H = (\ln P_n)^{-1}. \quad (3.10)$$

Для тех случаев, когда критерием эффективности служит вероятность обнаружения эхосигнала и дистанции до объекта, при которой обеспечивается эта вероятность, возможно перейти от выражения (3.9) к другому, содержащему эти величины. В формуле (3.9) член $\mathcal{E}(\delta_n/\delta_n)$ можно заменить произведением

$$\mathcal{E}(\delta_n/\delta_n) = W_a \tau \gamma_{изл} \gamma_{пр},$$

где W_a — излучаемая акустическая мощность; τ — длительность излучаемого сигнала; $\gamma_{изл}$, $\gamma_{пр}$ — коэффициенты концентрации АС в режимах излучения и приема соответственно. Используя известные соотношения, в том числе и уравнение дальности действия, можно записать следующее выражение:

$$W_a \tau \gamma_{изл} \gamma_{пр} \sim r_0^{(4+0,67a)} / \ln P_{об}, \quad (3.11)$$

где r_0 — дальность действия РПА в изотропной морской среде; a — коэффициент, определяемый исходными требованиями к проектированию аппаратуры (обычно $a=3-8$); $P_{об}$ — вероятность правильного обнаружения эхосигнала, которая равна $P_{об}=P_0 P_n$; P_0 — вероятность обнаружения рыбного косяка в данной ситуации. С учетом формул (3.10) и (3.11) выражение (3.9) примет вид

$$F_{ц} = r_0^{(4+0,67a)} \eta \gamma / \ln P_{об} \ln P_n V C_c C_b. \quad (3.12)$$

Под гибкостью системы γ понимается способность РПА работать в сложных условиях и обеспечивать различные режимы работы. Под структурной сложностью системы C_c понимают количество функциональных связей, приходящихся на один компонент структурной схемы, и определяется на уровне функциональных

блоков. Суммарная сложность блоков C_6 определяется числом типоразмеров блоков на уровне схем блоков с учетом входящих в них элементов. Кроме того, учитывается, что сравниваемая РПА работает в условиях одинаковых шумовых помех. Эффективность эталонной РПА принимается за единицу.

Таким образом, если заданы или получены в процессе расчета энергетические параметры РПА и конкретные условия ее применения, то, используя целевые функции, можно предложить близкую к оптимальной структуре аппаратуру, которая в данном случае будет иметь высокую технико-экономическую эффективность.

Однако и данный метод определения эффективности использования РПА не лишен недостатков: по нему нельзя судить о преимуществе одного способа обзора водного пространства перед другим, он не отражает точностных характеристик РПА, не совсем полно учитывает информационные качества и методы отображения гидроакустической информации, определение величин C_5 и C_6 во многом связано с субъективизмом исследователя, отсутствует конкретность выбора значения коэффициента a .

§ 3.3. Сравнительная оценка способов обзора по производительности поиска

Технические параметры и состав РПА в значительной степени зависят от принятого способа обзора акватории, т. е. метода поиска и определения координат обнаруженного объекта. Функциональное же построение самой РПА в существенной степени влияет на производительность поиска судна. Однако получить конкретно количественное выражение этого влияния на этапах проектирования представляется довольно сложной задачей. Поэтому сравнительные оценки в данном случае производятся с некоторыми допущениями.

За производительность поиска гидролокатора в данном случае примем объем водной среды, который можно обследовать гидроакустическим лучом за единицу времени при заданной скорости судна. Производительность поиска зависит от скорости судна, раствора ДН или сектора одновременного обзора в горизонтальной и вертикальной плоскостях, дальности действия гидролокатора и длительности излучаемого импульса. Если отсутствуют необследованные зоны, производительность поиска P_0 можно считать равной объему прямоугольного параллелепипеда с длиной, равной расстоянию, пройденному судном за единицу времени, шириной и высотой, равными ширине и высоте полосы поиска

$$P_0 = 2bhl_t, \quad (3.13)$$

где b — расстояние, обследуемое гидролокатором в траверсном направлении при заданном секторе обзора, м; h — глубина обследуемой зоны, м; l_t — путь, пройденный судном за время поиска, м. Для сектора обзора $\alpha < 180^\circ$ $b = r_{\max} \sin \alpha/2$, тогда

$$P_0 = 2r_{\max} \sin \alpha/2 vht, \quad (3.14)$$

где r_{\max} — максимальная дистанция обнаружения, обеспечиваемая гидролокатором, м; v — скорость судна, м/с; t — время поиска, с. При секторе обзора $\alpha \geq 180^\circ$ $b = r_{\max}$,

$$P_0 = 2r_{\max}vht. \quad (3.15)$$

Глубину обследуемой зоны приближенно определяют из выражения

$$h = r_{\max} \operatorname{tg} 2\theta_0, \quad (3.16)$$

где $2\theta_0$ — растров ДН в вертикальной плоскости.

При обследовании акватории гидролокатором шагового поиска всегда имеются необследованные участки и мертвые зоны в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Размеры этих участков зависят от скорости судна, дистанции поиска и скорости разворота АС. Отраженный от расположенных в пределах данных участков объекта поиска эхосигнал не принимается АС. Чем больше скорость судна, тем больше размеры необследованных участков. Имеются две возможности уменьшения этих участков: снижение скорости судна или уменьшение продолжительности одного цикла обзора. Однако при этом пропорционально снижается производительность поиска.

Производительность поиска P с учетом необследованных зон определяется

$$P = P_0 - V_{\text{м.з}}, \quad (3.17)$$

где $V_{\text{м.з}}$ — объемы необследованных участков, м³. Величину $V_{\text{м.з}}$ определяют как сумму необследованных объемов V за счет движения судна, конечной скорости разворота АС или времени обзора сектора, длительности импульса и т. п., образующихся за 1 час поиска

$$V_{\text{м.з}} = n_{\text{ц}} \sum V, \quad (3.18)$$

где $n_{\text{ц}} = 3600/t_{\text{ц}}$ — число циклов обзора заданного сектора за 1 час.

Продолжительность цикла обзора $t_{\text{ц}}$ равна

$$t_{\text{ц}} = T_{\text{обз}} + t_{\text{в}}, \quad (3.19)$$

где $T_{\text{обз}}$ — время активного обзора акватории, с; $t_{\text{в}}$ — продолжительность времени возврата ДН в исходное положение, равное

$$t_{\text{в}} = \alpha/\omega_{\text{воз}}, \quad (3.20)$$

где $\omega_{\text{воз}}$ — угловая скорость разворота АС при возврате его в исходное положение, град/с.

Время активного обзора $T_{\text{обз}}$ равно [37]

$$T_{\text{обз}} = 2r_{\max}n/c + t_{\text{пер}}(n + 1), \quad (3.21)$$

где n — количество направлений излучений в заданном секторе

обзора; $t_{\text{пер}}$ — время перешагивания или время изменения одного направления излучения при шаговом и секторном поиске, равно

$$t_{\text{пер}} = 2\theta_r/\omega, \quad (3.22)$$

где ω — угловая скорость поворота АС, град/с. Количество направлений излучения n в заданном секторе обзора α равно

$$n = \alpha/2\theta_r. \quad (3.23)$$

Точно определить $\sum V$ довольно сложно, так как искомые объемы являются сложными геометрическими фигурами. Приближенно их величину можно рассчитывать методом усреднения, учитывая геометрические построения траекторий лучей и путь, пройденный судном за время обзора.

Коэффициент производительности поиска в процентах определяется

$$K_n = (P/P_0) \cdot 100 \%. \quad (3.24)$$

Чем ближе эта величина к 100 %, тем эффективнее производительность поиска. За стопроцентную производительность поиска в данных расчетах принимается объем прямоугольного параллелепипеда (3.13).

Учитывая гидрологические условия распространения звуковых волн в море, следует отметить, что реально обследуемые акустическим лучом объемы будут отличаться от объемов, полученных путем элементарных геометрических построений, но общие закономерности в определении производительности поиска сохраняются.

Время обзора гидролокатором секторного обзора с $\alpha=90^\circ$ по сравнению с гидролокатором шагового поиска уменьшается приблизительно в 10 раз, т. е. значительно повышается вероятность обнаружения целей, или при одной и той же вероятности обнаружения имеется возможность повысить поисковую скорость судна. Величина же мертвой зоны $l_{\text{м.з}}$ для гидролокатора секторного обзора увеличивается в m раз — число ДН, размещаемых в заданном секторе обзора (см. § 2.2).

Эффективность поиска объектов эхолотом зависит от скорости хода судна и ширины полосы поиска, т. е. от раствора ДН антенны в плоскости шпангоута судна и максимальной требуемой глубины обнаружения цели. Так, производительность поиска придонной рыбы P_d , т. е. площадь дна, обследуемая судном с помощью эхолота, определяется выражением

$$P_d = bvt, \quad (3.25)$$

где b — ширина полосы поиска, м; v — скорость судна, м/с; t — время поиска, с. В зоне действия эхолота обследуемый объем будет равен

$$P_0 = bvr_{\text{max}}t/2. \quad (3.26)$$

В формуле (3.26) берется величина $r_{\max}/2$ ввиду конусности ДН. Приняв

$$b = 2r_{\max} \operatorname{tg} 2\theta/2, \quad (3.27)$$

где 2θ — растров ДН антенны эхолота в плоскости шпангоута судна, град, получим

$$P_0 = vr_{\max}^2 \operatorname{tg} 2\theta/2. \quad (3.28)$$

По этим показателям сравниваются разные типа эхолотов.

§ 3.4. Оптимизация РПА

Важным вопросом в теории и практике проектирования РПА является вопрос ее оптимизации. При решении задач оптимизации используются в основном три метода: метод перебора вариантов, метод параметрической оптимизации и метод синтеза, а иногда в слабо обусловленных ситуациях при недостатке исходной информации пользуются методом экспертных оценок [9].

При постановке вопроса об оптимизации РПА важно определить совокупность обобщенных исходных данных:

- определение задач, для решения которых предназначена аппаратура: обнаружение, измерение текущих координат и распознавание объектов промысла;

- описание внешних условий, в которых аппаратура должна использоваться: свойства объектов промысла и водной среды, т. е. характеристики сигналов и помех;

- определение ограничений, накладываемых на аппаратуру: энергетические возможности, допустимая степень сложности, ее надежность в работе, массогабаритные ограничения;

- определение функционала качества аппаратуры и алгоритма его оценки;

- описание множества подсистем, с помощью которых могут быть решены поставленные задачи.

Весьма важную роль при этом играет разработка математических моделей условий подводного наблюдения, сигналов, помех и РПА. По сути дела, от того, насколько полны такие модели и адекватны действительным явлениям и объектам, которые описывают, настолько эффективной в реальных условиях использования будет аппаратура, оптимизированная для совокупности данных, которые составлены на основе разработанных идеализированных математических моделей.

В работах Ольшевского В. В. на основании анализа эффективности существующей и перспективной РПА производится следующая классификация ее с точки зрения оптимизации.

1. Тривиальные системы. Для РПА этого класса не формируются количественные критерии качества, вследствие чего выбор основных параметров аппаратуры делается на основе тех или иных конструктивных и технических соображений.

2. Системы, оптимизированные энергетически. В качестве характеристики качества РПА этого класса используется отношение средних интенсивностей сигнала и помех. Здесь в первую очередь оптимизации подлежит рабочая частота аппаратуры. Характерно для РПА в этом случае то, что водная среда считается однородной и безграничной, отражающий объект точечным, учитывается явление только шумовой диффузной помехи, а в качестве излучаемых сигналов используются прямоугольные с синусоидальным заполнением. Подвергается оптимизации также полоса пропускания приемного тракта аппаратуры, которая согласовывается с длительностью излучаемого сигнала.

3. Системы, оптимизированные по вероятностным характеристикам сигналов и помех. Способы оптимизации РПА этого класса основываются на знании априорных распределений вероятностной зависимости эхосигналов и помех. В этом случае оптимизации подлежат: рабочая частота, длительность сигнала и его ширина полосы.

4. Системы, оптимизированные по вероятностным характеристикам сигналов, помех и условий подводного поиска. В отличие от способа рассмотрения РПА предыдущего класса процессы на выходе в этом случае представляются зависящими от некоторой совокупности параметров, характеризующих условия подводного наблюдения.

5. Системы с адаптивной оптимизацией. Анализ характеристик условий подводного наблюдения показывает, что вариации параметров водной среды, отражающих объектов, шумовой и реверберационной помех от одного района к другому, а также в различные периоды (например, времена года) оказываются весьма значительными. Достаточно указать, что уровни помех могут изменяться во много раз, характеристики эхосигналов, зависящие от условий распространения звука в водной среде и особенностей его отражения от тех или иных промысловых объектов, также сильно варьируются и т. д. Это означает, что РПА, оптимизированная в основном по третьему и четвертому признакам, в подавляющем большинстве ситуаций оптимальной не будет.

Между тем, в процессе рыболокации в тех или иных условиях подводного наблюдения можно получить целый ряд сведений о подводной обстановке, таких, в частности, как характеристики помех, аномалии распространения звука, значения секторов обзора и дистанций, в пределах которых целесообразно вести подводный поиск и т. п. Иными словами, в конкретных условиях промысла можно сузить рассматриваемый интервал вариаций параметров водной среды и отражающего объекта, а параметры помех определить с достаточной точностью. В этом случае оптимальные параметры РПА будут больше соответствовать каждому конкретным условиям гидролокации, чем в предыдущих случаях.

Разумеется, повышение полноты оптимизации аппаратуры связано с ее усложнениями, с необходимостью использования современных методов ее проектирования.

Практическое применение результатов решения задач оптимизации наталкивается на существенные трудности. Здесь от проектировщика требуется практический опыт, инженерная интуиция и изрядная доля здравого смысла. В общем случае нельзя найти систему, наилучшую по всем показателям одновременно. Поэтому нужно от совокупности показателей качества аппаратуры переходить к нескольким отдельным или чаще всего к одному основному по значимости показателю. Проектировщику очень часто приходится искать компромиссные решения между несколькими показателями. Следует помнить, что не существует систем оптимальных вообще, а может существовать система, оптимальная в смысле заданного критерия, и что все реальные задачи, возникающие в процессе проектирования, не допускают абсолютно строгого решения [9, 74].

Глава 4

ГИДРОАКУСТИЧЕСКИЕ УРАВНЕНИЯ

§ 4.1. Основное уравнение гидролокации

Как известно, большинство явлений и особенностей, присущих распространяющимся под водой звуковым колебаниям, оказывают непосредственное влияние на расчет параметров и работу при эксплуатации РПА. Эти разнообразные процессы могут быть достаточно логично объединены количественно в небольшие ряды группы, называемые *акустическими параметрами*, а последние в свою очередь могут быть связаны *уравнениями гидролокации*. Такие уравнения устанавливают связь между явлениями в среде, объекте локации и аппаратуре. Они относятся к числу тех средств, которыми могут пользоваться инженеры при оптимальном проектировании и прогнозировании работы РПА, а также в процессе эксплуатации при необходимости сравнения оценок аппаратуры или определения параметров среды и лоцируемого объекта.

В основу уравнений гидролокации положено обеспечение равенства или определенного заданного соотношения между полезной частью акустического поля в точке приема (сигнала) и элементами поля, затрудняющими выделение и распознавание сигнала (помехи или фона) [96].

Полезный сигнал всегда флюктуирует на фоне помех. Главная цель проектировщика РПА — поиск средств, увеличивающих общую чувствительность аппаратуры к полезному сигналу и уменьшающих ее чувствительность к мешающему фону, или другими словами, увеличивающих соотношение сигнал/помеха. Выполнение решения поставленной задачи перед РПА оказывается возможным практически с того момента, когда уровень полезного сигнала станет превышать уровень маскирующей его помехи, или в крайнем случае будет равным ему, т. е. аппаратура начинает решать

свою задачу, когда *уровень сигнала=уровню маскирующей помехи*. Это равенство и называется *основным равенством гидролокации*.

Термин *маскирующая помеха* означает, что с сигналом взаимодействует не весь шумовой фон, а только та его составляющая, которая лежит в частотной полосе сигнала.

Следует отметить, что установленное выше равенство выполняется только в какой-то определенный момент времени в процессе приближения объекта локации к гидроакустическому приемнику или удаления от него. На более близких дистанциях уровень сигнала, приходящего от объекта, превышает уровень маскирующей помехи, а при больших расстояниях наблюдается обратное соотношение. При проектировании же РПА за основу берется именно событие равенства сигнала и уровня маскирующей помехи, поскольку в этот момент аппаратура начинает практически решать поставленную перед ней задачу.

В практическом применении основное равенство гидролокации аналитически записывается следующим образом [87]:

$$I_c = \delta^2 I_n, \quad (4.1)$$

где I_c — интенсивность сигнала в точке приема; I_n — интенсивность акустических помех в точке приема; δ — коэффициент распознавания и называется основным уравнением гидролокации.

§ 4.2. Уравнения гидролокации

В последнее время в литературе по основам гидроакустики [41, 47, 96, 99] все шире применяются гидроакустические уравнения, в которых параметры среды, лоцируемого объекта и самой аппаратуры выражаются в децибелах. Эти уравнения очень просты при инженерных расчетах параметров гидролокации, так как для их решения необходим самый простой математический аппарат, состоящий из операций сложения и вычитания, но в то же время они требуют от инженеров понимания физических процессов, происходящих в среде, объекте локации и самой аппаратуре, знания взаимосвязей этих процессов, а также зависимостей всех величин, входящих в уравнения.

Для вывода уравнений гидролокации необходимо раскрыть основное равенство через параметры гидролокации, определяемые характеристиками аппаратуры, среды и объектов локации.

Если при работе РПА активного действия в режиме эхопеленгования источник звуковых колебаний через преобразователь, выполняющий одновременно и функции приемника звука, создает в водной среде акустические колебания, которые характеризуются некоторой интенсивностью на определенном стандартном расстоянии от преобразователя (в отечественной практике это стандартное расстояние принимается равным 1 м), то эта интенсивность, выраженная в децибелах на 1 м от преобразователя, называется *уровнем источника SL[96]*. При достижении звуковой волной

объекта локации (если ось источника направлена на объект) ее уровень уменьшается из-за существующих потерь в среде при передаче на величину TL и становится равным $SL - TL$. Лоцируемый объект отражает или рассеивает пришедший уровень энергии на величину TS , называемую *силой цели*, в направлении источника звука. Тогда на расстоянии 1 м от акустического центра объекта локации в направлении источника звука общий уровень энергии будет равен $SL - TL + TS$. При распространении энергии обратно к источнику (в данном случае выполняющему функции приемника) уровень звука вновь ослабляется вследствие потерь в среде при обратной передаче и становится равным $SL - 2TL + TS$. Эта величина представляет собой уровень эхосигнала у приемного преобразователя EL . Для упрощения полагают, что помеха является изотропной, а не реверберационной, и обозначают ее NL . Тогда ее уровень будет уменьшен благодаря направленности приемного преобразователя, и относительный уровень шума непосредственно на антенне определится как $NL - DI$ (DI — коэффициент направленности антенны). Так как ось акустической антенны направлена на объект, коэффициент ее направленности не влияет на уровень эхосигнала. Непосредственно на преобразователе, следовательно, будет следующее соотношение сигнал/помеха

$$SL - 2TL + TS - (NL - DI).$$

Любой процесс обнаружения включает в себя понятие порога обнаружения DT , который будучи превышен, вызывает регистрацию объекта поиска, т. е. характеризующий некоторый вероятностный критерий обнаружения. Когда соотношение сигнал/помеха меньше порога обнаружения, принимается решение, что интересующий нас объект отсутствует. Минимальное соотношение этих величин, при которых объект считается обнаруженным, принимается обычно при их равенстве, т. е.

$$SL - 2TL + TS - (NL - DI) = DT.$$

Несколько более удобной формой записи этого уравнения является следующая

$$SL - 2TL + TS = NL - DI + DT. \quad (4.2)$$

В этом уравнении параметры, относящиеся к уровню эхосигнала, находятся в левой части, а параметры уровня маскирующей помехи — в правой части.

В некоторых случаях разделение DI и DT практически оказывается невозможным. В этих случаях более удобен непосредственный учет их совместного воздействия, т. е. $DI - DT$, определяющий изменения в соотношении сигнал/помеха, создаваемые с помощью всего приемного тракта с антенной, индикаторных устройств и оператора.

В тех случаях, когда помехой является реверберация, а не шум моря, уравнение (4.2) необходимо видоизменить, поскольку параметром DI , определяемым для изотропного поля помех,

пользоваться нельзя вследствие неизотропного характера реверберационной помехи. В этом случае параметр $NL-DI$ заменяется уровнем реверберации RL , измеренного на выходе акустического приемника, и тогда уравнение активной гидролокационной аппаратуры примет вид

$$SL - 2TL + TS = RL + DT. \quad (4.3)$$

Полученные выражения (4.2) и (4.3) называют уравнениями активной гидролокации, используемой в режиме эхопеленгования.

При работе пассивной гидроакустической аппаратуры, когда сам объект является источником сигнала, благодаря чему он и обнаруживается, параметр уровня источника SL относится к уровню создаваемого объектом звука на стандартном расстоянии 1 м от него. Параметры силы цели и уровня реверберации в этом случае отсутствуют, а величина потерь значительно меньше за счет одно-стороннего распространения. Тогда уравнение аппаратуры пассивного действия приобретает следующий вид:

$$SL - TL = NL - DI + DT. \quad (4.4)$$

В полученных уравнениях имеются параметры, определяемые аппаратурой SL, DI, DT (к ним также может быть отнесен и уровень собственных шумов аппаратуры, обозначаемый также через NL , так как он идентичен уровню помех среды); средой TL, RL, NL и объектами локации TS, SL (для пассивных систем).

На практике оказывается удобным иногда присваивать наименования для отдельных комбинаций параметров, так как существующие методы измерения величин ряда этих комбинаций в судовых гидролокаторах используются для проверки работоспособности систем. Выражение $SL - 2TL + TS$ называется уровнем эхосигнала и представляет собой интенсивность эхосигнала, измеренную в воде у акустического приемника; $NL - DI + DT$ — уровнем маскирующего шума (помехи) или минимальным обнаруживаемым уровнем эхосигнала; $RL + DT$ — уровнем маскирующей реверберации; $SL - 2TL + TS - (NL - DI + DT)$ — уровнем превышения эхосигнала. Иногда применяются и другие сочетания этих параметров.

§ 4.3. Вероятностная оценка порогового отношения сигнал/помеха

Как видно из § 4.2, все параметры, входящие в уравнение гидролокации, кроме параметра порога обнаружения DT , представляют собой выраженные в децибелах уровни, отнесенные к эталонной интенсивности плоской волны с давлением 1 мкПа. Если все эти параметры являются функциональными зависимостями параметров аппаратуры, среды и объектов локации, то параметр порога обнаружения представляет собой результирующий продукт только проектанта РПА или оператора. Естественно, от правильно обоснованного его выбора разработчиком РПА в сильной степени

зависят энергетические параметры аппаратуры и, как следствие, ее тактические возможности и массогабаритные данные.

Отношение сигнал/помеха при заданной вероятности называется порогом обнаружения и относится ко входу системы приемник—индикатор—оператор. Для процесса обнаружения требуется наименьшее отношение сигнал/помеха. Именно оно предъявляет к разработчику РПА наиболее жесткие требования.

Определение «порог обнаружения» включает в себя два из наиболее важных аспектов процесса выделения сигнала на фоне помех.

При выводе выражений для порога обнаружения используется метод, заключающийся в том, что решение о наличии или отсутствии цели рассматривается как конечный результат, который должен быть увязан с соотношением сигнал/помеха на входе системы обнаружения.

При определении величины порога обнаружения для конкретной РПА необходимо прежде всего установить примерные вероятности правильного обнаружения и ложной тревоги для условий, в которых будет использоваться эта аппаратура. Вероятность того, что в случае присутствия сигнала принято правильное решение «сигнал есть» называется *вероятностью правильного обнаружения* $P_{п.о.}$. Вероятность того, что в случае отсутствия сигнала принимается неверное решение «сигнал есть» называется *вероятностью ложной тревоги* $P_{л.т.}$. Порог обнаружения зависит от этих двух независимых друг от друга вероятностей. При проектировании РПА точно определить эти величины чрезвычайно трудно, поскольку они меняются в широких пределах в зависимости от назначения РПА, тактики ее использования и внешних факторов, характерных для условий, в которых ей предстоит работать.

Чаще всего $P_{п.о.}$ и $P_{л.т.}$ выбираются на основе опыта, интуиции и четкого понимания задач, которые должны решаться проектируемой РПА. Более того, при промысловой эксплуатации, когда в процессе принятия решения участвует оператор, критерии порога, в соответствии с которыми оператор принимает решение о наличии или отсутствии цели, часто определяются нечетко (качество оператора) и порог обнаружения соответственно оказывается не четко установленным.

В отечественной литературе порог обнаружения выражается через коэффициент распознавания следующим выражением:

$$DT = 20 \lg \delta. \quad (4.5)$$

Исходя из выше сказанного, следует, что расчет технических параметров при проектировании РПА необходимо начинать с определения коэффициента распознавания с учетом вероятностных характеристик обнаружения.

Обычно вероятностные характеристики обнаружения $P_{п.о.}$ и $P_{л.т.}$ задаются техническим заданием на разработку новой РПА или выбираются самим разработчиком, исходя из тактического назначения аппаратуры и четкого понимания решаемых ею задач.

Так как гидроакустическая РПА работает в пространственно-временной области и имеет конечное множество элементарных ячеек обзора, вероятная оценка обнаружения полезного сигнала на фоне помех должна производиться с учетом многоальтернативности ситуаций. В практике проектирования РПА принято, что задаваемая вероятность ложной тревоги $P_{л.т}$ определяет вероятность возникновения ложных тревог за один цикл излучения—приема в целом по всей гидролокационной системе.

Вероятность ложной тревоги в элементарной ячейке, как известно из [62], определяется выражением

$$P_{л.т.яч} = P_{л.т}/m, \quad (4.6)$$

где m — число ячеек или альтернатив. Для классического случая построения РПА число альтернатив равно

$$m = m_r m_\alpha m_\beta m_f, \quad (4.7)$$

где $m_r = 2r/ct_{выб}$ — число альтернатив по дистанции; $m_\alpha = \alpha/2\theta_r$ — число альтернатив по пеленгу; $m_\beta = \beta/2\theta_v$ — число альтернатив по углу места; $m_f = \Delta f \tau$ — число альтернатив по частоте в случае реализации отдельных частотных каналов в системе обработки; r — дистанция до лоцируемого объекта; $t_{выб}$ — время между выборками эхосигналов в одном пространственном канале; α и β — ширина сектора сканирования в горизонтальной и вертикальной плоскостях; $2\theta_r$ и $2\theta_v$ — ширина ДН в горизонтальной и вертикальной плоскостях; Δf — полоса пропускания приемного тракта; τ — длительность зондирующего импульса.

При аналоговой системе обработки эхосигналов $t_{выб} = \tau$. При использовании устройств цифровой обработки m_r равно количеству соответствующих выборок в одном пространственном направлении на входе этих устройств. Число альтернатив по пеленгу m_α обычно соответствует количеству пространственных каналов. Для однолучевых гидролокаторов и эхолотов $m_\alpha = 1$. Число альтернатив по углу места m_β учитывается в гидролокаторах, сканирующих в вертикальной плоскости, во всех остальных случаях $m_\beta = 1$. Число альтернатив по частоте m_f учитывается при частотной обработке эхосигналов, во всех остальных случаях $m_f = 1$.

В РПА для оценки отношения сигнал/помеха принимается модель обнаружения, справедливая в широком классе условий подводного наблюдения — прием простых флюктуирующих сигналов на фоне помехи с нормальным распределением. В этом случае при линейном детектировании, когда амплитуда эхосигнала флюктуирует по релеевскому закону, а сигнал имеет синусоидальное заполнение, для вероятности правильного обнаружения справедливо соотношение

$$P_{п.о} = l^{l_n P_{л.т.яч}/(1+q)}, \quad (4.8)$$

где q — отношение дисперсии флуктуации эхосигнала к дисперсии помехи. Согласно [62] q можно представить как

$$q = \delta^2 - 1, \quad (4.9)$$

где δ можно принять равным отношению средней амплитуды сигнала к средней амплитуде помехи.

Данные рассуждения относятся к обнаружению по одиночной посылке зондирующего импульса. Но так как РПА позволяет производить обнаружение эхосигнала по правилу «один эхоконтакт за N посылок», вероятность правильного обнаружения будет соответствовать кумулятивной вероятности обнаружения, определяемой как

$$P_{к.о} = P_{п.о} = 1 - (1 - P_{п.о}^*)^N, \quad (4.10)$$

где N — число циклов, за которые происходит хотя бы один эхоконтакт с объектом; $P_{п.о}^*$ — вероятность правильного обнаружения объекта в каждом цикле. При использовании кумулятивной вероятности обнаружения важно правильно выбрать параметр N , чтобы он согласовывался с тактико-техническими параметрами аппаратуры.

В качестве примера рассчитаем ДТ для комплекса, состоящего из гидролокатора с одновременным сектором обзора 90° и эхолота для обнаружения рыбы на больших глубинах, с использованием устройств цифровой обработки сигналов.

Для гидролокатора в режиме секторного обзора точечные цели, находящиеся в средней части зоны поиска, просматриваются длительное время и в данном случае практических ограничений по N может и не быть. Но для целей, находящихся на крайних участках зоны поиска, время нахождения цели в просматриваемом объеме ограничено. Так, для диаграммы направленности $2\theta_r = 6,5^\circ$ и угле отклонения от курса судна 45° можно показать путем простых расчетов, что при скорости судна 15 уз и скорости цели 4 уз на дистанции 3000 м точечная цель будет находиться в лоцируемом объеме в течение времени, соответствующем 9 циклам зондирования, т. е. $N=9$. Значения $P_{п.о}$ берутся из технического задания. В данном случае $P_{п.о}=0,8$, $P_{л.т}=0,1$.

Для эхолота при ширине диаграммы направленности в диаметральной плоскости судна $2\theta = 6,5^\circ$, глубине обнаружения $r=2000$ м и тех же $P_{п.о}$ и $P_{л.т}$ и скоростях судна и цели последняя находится в лоцируемом объеме в течение времени, соответствующем восьми циклам зондирования.

Примем для гидролокатора и эхолота $N=8$, тогда согласно формуле (4.10) величина $P_{п.о}^*=0,184$. При использовании устройств цифровой обработки сигналов число альтернатив по дистанции равно количеству соответствующих выборок в одном пространственном направлении на входе этих устройств, а число альтернатив по пеленгу — количеству пространственных каналов. Число альтернатив по дистанции зависит от технических решений

и часто на практике принимается равным $m_r=512$, а число альтернатив по пеленгу для гидролокатора с учетом перекрытий диаграмм направленности $m_\alpha=16$. Для эхолота число альтернатив по пеленгу равно единице. Следовательно, $m_r=8192$, а $m_\alpha=512$. Таким образом, $P_{л. т. яч}$ согласно формуле (4.6) составляет: для гидролокатора $P_{л. т. яч}^r=1,22 \cdot 10^{-5}$, для эхолота $P_{л. т. яч}^э=1,95 \cdot 10^{-4}$.

Для удобства расчетов применительно для нашего случая, преобразовав выражение (4.8) с учетом выражения (4.10) к виду

$$q = \frac{\ln P_{л. т. яч}}{\ln P_{п. о}^*} - 1, \quad (4.11)$$

получим: для гидролокатора $q_r=5,68$, для эхолота $q_\alpha=4,046$. Затем согласно выражению (4.9): для гидролокатора $\delta_r=2,6$; для эхолота $\delta_\alpha=2,24$. По выражению (4.5) определяем $DT_r=20 \lg 2,6=8,3$ дБ, $DT_\alpha=20 \lg 2,24=7$ дБ.

Глава 5

ДАЛЬНОСТЬ ДЕЙСТВИЯ

§ 5.1. Геометрическая дальность действия

Дальность (или глубина) обнаружения является одним из основных тактических параметров РПА и определяется максимальным расстоянием по горизонту или глубине, на котором может быть обнаружен промысловый объект [25, 53, 69, 81, 90, 96, 99, 120].

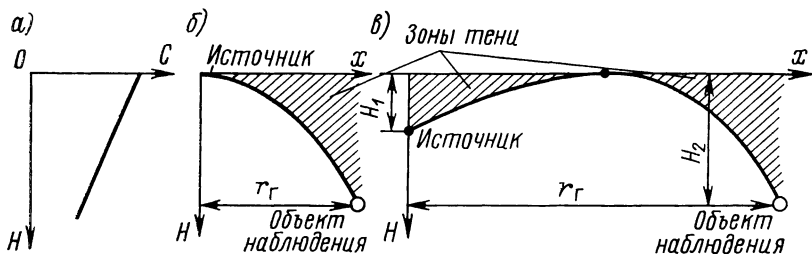


Рис. 5.1. К объяснению геометрической дальности действия r_g за счет отрицательной рефракции: а — изменение скорости звука c с глубиной H ; б — излучающий источник находится у поверхности моря; в — излучающий источник — заглублен.

В случае горизонтального зондирования различают энергетическую и геометрическую дальности обнаружения [41, 87]. Энергетическая дальность обнаружения r_{\max} является основным параметром РПА при благоприятных гидрологических условиях среды (т. е. при прямолинейном распространении звука в воде) и определяется техническими характеристиками аппаратуры, свойствами среды, отражающими и рассеивающими свойствами объекта локации.

Изменение скорости звука c с глубиной приводит к искривлению (рефракции) звуковых лучей (рис. 5.1). Вследствие этого,

так называемая, геометрическая дальность действия r_r может быть меньше энергетической. Рефракция звука приводит к образованию зоны тени, в которую не проникают акустические лучи. Изменение скорости звука с глубиной (градиент скорости) может быть и положительным и отрицательным. Акустические лучи всегда изгибаются по направлению к снижению скорости звука. Наиболее неблагоприятным для целей гидролокации является случай отрицательной рефракции, когда искривление акустических лучей в сторону дна происходит под влиянием уменьшающейся скорости звука с глубиной (рис. 5.1, а). В мировом океане подобное распределение скорости звука встречается наиболее часто. При отрицательной рефракции к акустически освещенной зоне прилегает область акустической тени (заштрихованная часть рис. 5.1, б, в). Между областями акустической тени и акустически освещенной существует граница, которая практически часто оказывается границей дальности действия РПА. Отсюда выводится понятие геометрической дальности действия, под которой подразумевается горизонтальное расстояние от источника звука до границы тени.

В случае положительной рефракции можно не учитывать ее влияние на ограничение энергетической дальности действия РПА, т. е. реальную максимальную дистанцию обнаружения РПА можно практически оценивать лишь энергетической дальностью действия аппаратуры.

Геометрическая дальность действия рассчитывается по формуле

$$r_r \approx (2c_0 H_2 / G_c)^{1/2}, \quad (5.1)$$

где c_0 — скорость звука на уровне источника; H_2 — глубина нахождения промыслового объекта; G_c — вертикальный градиент скорости звука. Граница геометрической дальности значительно отодвигается при заглублении источника звука. При этом геометрическую дальность определяют по лучу, претерпевающему полное внутреннее отражение у поверхности моря (рис. 5.1, в). Для этого случая

$$r_r = (2c_0 / G_c)^{1/2} (H_1^{1/2} + H_2^{1/2}), \quad (5.2)$$

где H_1 — заглубление источника звука.

Зная гидрологические разрезы в предполагаемых районах промысла, при использовании аппаратуры с адаптивной оптимизацией, например, РПА с буксируемыми антеннами, можно, оптимизировав такие параметры, как глубина погружения антенн, ширина ДН, угол наклона ДН, и используя явление фокусировки звуковой энергии, значительно отодвинуть границы геометрической дальности действия. Реальная дальность действия РПА в отдельных случаях может превышать даже энергетическую.

При вертикальном же зондировании (эхолотировании) основным тактическим параметром является глубина обнаружения объекта, определяемая только энергетической дальностью действия аппаратуры.

§ 5.2. Влияние акустических характеристик морской среды на дальность обнаружения

Акустические характеристики морской среды в значительной степени определяют дальность обнаружения РПА. К акустическим характеристикам среды относят скорость звука c и ее распределение по глубине (иногда и по горизонту), коэффициент затухания β , рассеивающие и поглощающие свойства водной среды, дна и поверхности океана, а также шумы океана [12, 98, 120]. Влияние первых двух мы кратко рассмотрели в предыдущем параграфе.

Ограничение энергетической дальности РПА во многом связано с постепенным затуханием интенсивности звука в океане. Коэффициент затухания β определяется процессами поглощения и рассеяния звука и чаще всего выражается в дБ/км. Для диапазона частот от 20 Гц до 60 кГц при расчете энергетической дальности РПА иногда пользуются эмпирической формулой [12, 87, 98].

$$\beta = 0,036f^{3/2}, \quad (5.3)$$

где β выражается в дБ/км, а f — в кГц.

При расчете затухания необходимо учитывать такие существенные факторы как температура воды T , соленость s , гидростатическое давление p_r и др. Они учтены в эмпирической формуле Шулькина—Марша [2, 12, 120], справедливой для частот выше 2—3 кГц,

$$\beta = 8,68 [Asf_{\tau}f^2/(f_{\tau}^2 + f^2) + Bf^2/f_{\tau}] (1 - 6,54 \cdot 10^{-4} p_r), \quad (5.4)$$

где $A = 2,34 \cdot 10^{-3}$; $B = 3,38 \cdot 10^{-3}$; $f_{\tau} = 21,9 \cdot 10^6 - 1520/(T + 273)$; β выражается в дБ/км, f — в кГц, s — ‰, T — °С, p_r — в кг/см².

Изменения солёности в океане невелики, поэтому в расчетах дальности РПА ее принимают равной средней величине $s \approx 34$ ‰. Наибольшее влияние оказывает изменение температуры. На рис. 5.2 приведена серия расчетных графиков для оценки коэффициента затухания в функции от температуры воды в различных районах промысла на частотах, характерных для РПА [37]. Графики построены по формуле (5.4) при $s = 34$ ‰ без учета последнего множителя, определяющего влияние гидростатического давления.

Анализ графиков, приведенных на рис. 5.2, показывает, что:

- климатические условия существенно влияют на величину β , а, следовательно, и на дальность действия гидролокатора;

- проектировщикам РПА надо рассчитывать энергетическую дальность при максимальных значениях β , для рабочих частот $f \leq 80$ кГц температуру воды в расчетах следует принимать минимальной, для $f > 100$ кГц — максимальной (конкретные значения T следует задавать только в случае разработки гидролокатора для заданного климатического района);

— в технической документации на РПА дальность действия необходимо приводить с указанием температуры воды;

— специалистам, эксплуатирующим РПА, необходимо знать и учитывать изменения температуры в районе промысла для оценки возможных изменений показаний регистрирующих приборов.

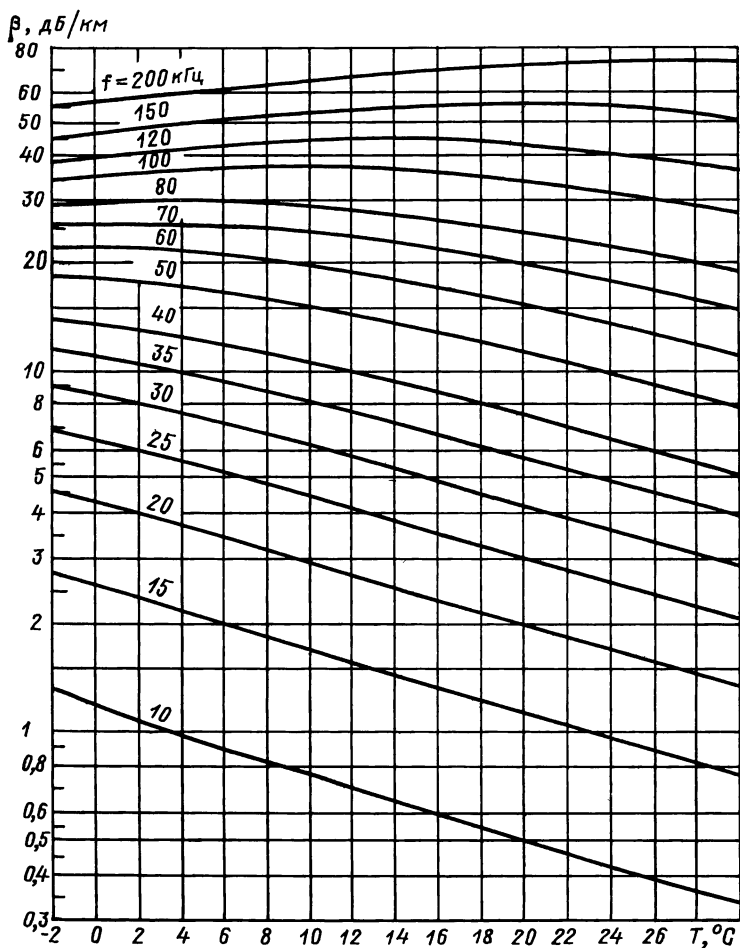


Рис. 5.2. График зависимости коэффициента затухания β от температуры воды T и рабочей частоты РПА f .

Вопрос необходимости учета гидростатического давления p_r на величину затухания β при конструировании РПА возник в связи с изменением промысловой ситуации в Мировом океане. Еще недавно до 90 % океанской рыбы добывалось на морских шельфах с глубинами до 200 м. При таких глубинах не было необходимо-

сти учета p_r . Конструировали и эксплуатировали рыбопоисковые эхолоты с небольшими энергетическими потенциалами. Самые мощные эхолоты в ту пору были способны обнаруживать одиночную рыбу с $TS = -26$ дБ ($R_0 = 0,1$ м) на глубинах до 800 м. Ситуация резко изменилась с введением большинством стран 200-мильных национальных рыболовных экономических зон. Многие рыболовные страны, в том числе и наша страна, вынуждены были интенсивно осваивать промысел рыбы в открытых просторах океана на больших глубинах. В короткий срок были созданы рыбопоисковые эхолоты и орудия лова для глубин порядка 2000 м. В настоящее время создаются и более мощные рыбопоисковые приборы. Особенности конструирования и создания глубоководной РПА, связанные с увеличением мощности и сложности приборов, ростом размеров антенных систем и усложнением устройств стабилизации луча и др., будут обсуждены в последующих главах.

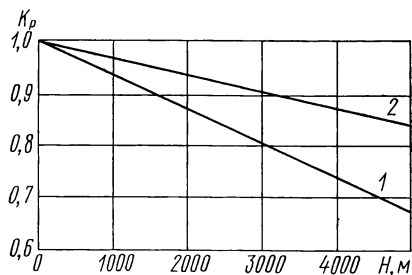


Рис. 5.3. Зависимость коэффициентов гидростатического давления k_p (кривая 1) и $k_{p\text{ср}}$ (кривая 2) от глубины океана.

В данном параграфе оценим влияние p_r на величину β . В формуле (5.4) последний сомножитель можно назвать коэффициентом K_p , учитывающим влияние гидростатического давления на величину затухания

$$K_p = 1 - 6,54 \cdot 10^{-4} p_r. \quad (5.5)$$

На рис. 5.3 приведен график изменения K_p (кривая 1) при увеличении глубины океана H . Видно, что на глубине $H = 5000$ м затухание звука на треть меньше, чем у поверхности. Акустический сигнал рыбопоискового эхолота по мере изменения глубины проходит слои воды с различными значениями β , поэтому для расчетов глубоководных систем следует брать среднее значение коэффициента (кривая 2 на рис. 5.3).

$$K_{p\text{ср}} = (1 + K_p)/2. \quad (5.6)$$

При этом акустический сигнал глубоководных эхолотов большую часть времени распространяется в слоях воды с устойчивой пониженной температурой, поэтому при расчетах следует выбирать значения β на графиках, приведенных на рис. 5.2, для $T = +4^\circ\text{C}$.

Естественно, что наибольшее влияние на все последующие этапы конструирования РПА имеет выбор величины $K_{p\text{ср}}$ для буксируемых глубоководных эхолотов и эхолотов, предназначенных для исследования грунтов на больших глубинах (до 6000 м и более).

§ 5.3. Метод расчета энергетической дальности действия РПА по номограммам

Основными характеристиками дальности действия гидроакустической аппаратуры являются вероятность правильного обнаружения объекта, вероятность ложной тревоги, уровень помех, отношение сигнал/помеха и интенсивность сигнала в точке приема. Изменение дальности действия РПА зависит только от функции изменения интенсивности сигнала с расстоянием, если указанные вероятности имеют фиксированные значения; а уровень помех не зависит от расстояния до объекта.

При ориентировочных расчетах энергетических дальностей гидролокаторов и эхолотов можно использовать выведенную из основного уравнения гидролокатора формулу [87]

$$r^8 = W_a T R_s^2 S^2 A^2 / 4,8 \cdot 10^{14} k_\delta I_{\text{пс}}, \quad (5.7)$$

где r — дальность действия; W_a — излучаемая акустическая мощность; T — время усреднения сигнала (на практике принимается равным длительности импульса посылки τ); R_s — радиус эквивалентной сферы; S — площадь антенны; A — фактор аномалии, равный отношению интенсивности сигнала в неоднородной среде к его интенсивности в однородной среде (для практических расчетов принимается равным 1); k_δ — коэффициент надежности приема, показывающий минимально допустимое отношение сигнал/помеха на входе индикатора; $I_{\text{пс}}$ — интенсивность акустической помехи в месте приема, приведенная к стандартным условиям ($f=1$ кГц, $\Delta f=1$ Гц, $\gamma=1$).

Однако расчет по формуле (5.7) не позволяет получить достаточную для практики точность. Эта формула выведена из предположения, что каждой дистанции обнаружения соответствует своя определенная оптимальная частота излучения. При выводе формулы оптимальной частоты одним из обязательных условий является постоянство либо площади излучения антенны, либо ширины ДН [87]. Эти условия в РПА зачастую не выполняются. При использовании РПА на рыбном промысле широко практикуют переключение ДН в зависимости от условий и районов поиска, в результате чего максимальная дистанция обнаружения в значительной степени изменяется, а частота излучения остается постоянной.

Более точную оценку дистанции обнаружения можно произвести с помощью преобразования основного уравнения гидролокации (4.1) к виду

$$W_a \gamma R_s^2 / 16 \pi r^4 10^{0,2\beta r} = \delta^2 I_{\text{п}}, \quad (5.8)$$

где γ — коэффициент концентрации антенны.

Расчет дальности действия по формуле (5.8) неудобен, так как вычисления производятся методом постепенного приближения путем подстановок величин дальностей и сравнения полученных результатов. Но основная трудность при использовании формулы (5.8) состоит в оценке величины W_a . В современной РПА акусти-

ческие антенны размещаются в обтекателях или защищаются звукопрозрачными мембранами. Учет влияния обтекателей антенн на энергию излучаемого сигнала требует дополнительного перерасчета значения W_a . В процессе эксплуатации аппаратуры коэффициент звукопрозрачности обтекателей (мембран) может изменяться в значительной степени вследствие их обрастания, заиливания, изменения геометрической формы из-за небольших механических повреждений и т. д. Само же значение W_a также может изменяться вследствие старения пьезокерамики, полного или частичного выхода из строя отдельных элементов многосекционированных АС, снижения сопротивления изоляции и т. п. В современной РПА широко используются режимы работы со ступенчатым или плавным изменением мощности излучения, с переключением ДН, большим набором диапазонов и длительностей излучения, в результате чего также изменяются значения W_a . В технической же документации на аппаратуру чаще всего приводится только значение максимальной дальности действия.

Кроме того, величина W_a обычно обслуживающему персоналу неизвестна, а в технической документации на аппаратуру чаще всего даны значения приведенных акустических давлений, которые к тому же относительно просто могут быть измерены известными методами с учетом реальных потерь мощности в обтекателе конкретного образца.

Для расчета дальности действия можно использовать уравнение гидролокатора, выраженное в логарифмической форме, в котором входящие величины измеряются в децибелах. Но для вычисления в децибельной форме входящих в уравнение величин необходимо применение счетной техники или специальных таблиц. Поэтому данный метод на практике находит малое применение.

Наиболее универсальным способом расчета дальности действия РПА является графический [38], в котором за исходную величину принимают приведенное звуковое давление $p_{эф(1 м)}$. Расчетные соотношения получаем из уравнения гидролокации (4.1) для интенсивности в точке прямого хода луча

$$I_c = W_a \gamma / 4\pi r^2 \cdot 10^{0,1\beta r}. \quad (5.9)$$

Для расстояния 1 м пространственным затуханием пренебрегаем, тогда $10^{\beta r} = 1$, и, учитывая, что $r = 1$, получаем $I_{c(1 м)} = W_a \gamma / 4\pi$. Используем известное соотношение в плоской волне $p_{эф} = (I_c \rho c)^{1/2}$, тогда приведенное звуковое давление на расстоянии 1 м от поверхности излучателя будет равно

$$p_{эф(1 м)} = (I_{c(1 м)} \rho c)^{1/2} = (W_a \gamma \rho c / 4\pi)^{1/2} = 3,46 \cdot 10^2 (W_a \gamma)^{1/2}. \quad (5.10)$$

При отражении от объекта с эквивалентным радиусом $R_э$ формула (5.9) принимает вид

$$I_c = W_a \gamma R_э^2 / 16\pi r^4 \cdot 10^{0,2\beta r}. \quad (5.11)$$

Тогда с учетом (5.11) получаем

$$p_{\text{эф}} = (I_{\text{ср}} c)^{1/2} = (W_{\text{а}} \gamma R_{\text{э}}^2 \rho c)^{1/2} / (4\pi)^{1/2} r^2 \cdot 10^{0,1\beta r} = p_{\text{эф (1 м)}} R_{\text{э}} / 2r^2 \cdot 10^{0,1\beta r} = \delta p_{\text{п}}, \quad (5.12)$$

где δ — коэффициент распознавания гидролокационных систем, $\delta = k_{\delta} (\Delta f T)^{-1/2}$; $p_{\text{п}}$ — эффективное значение звукового давления помех.

Звуковое давление помех на рабочей частоте f в полосе пропускания Δf приемного тракта определяется выражением

$$p_{\text{п}} = p_{\text{п.с}} \Delta f^{1/2} / f \gamma^{1/2}, \quad (5.13)$$

где $p_{\text{п.с}}$ — суммарный уровень помех в месте установки антенны, приведенной к стандартным условиям, Па; f и Δf — Гц.

В итоге приведенное к 1 м звуковое давление (5.12) с учетом (5.13) получаем в виде

$$p_{\text{эф (1 м)}} R_{\text{э}} / 2r^2 \cdot 10^{0,1\beta r} = 2^{1/2} k_{\delta} p_{\text{п.с}} f^{-1} (\gamma T)^{-1/2}. \quad (5.14)$$

Логарифмируя полученное выражение (5.14) и представляя входящие величины в децибелах, а $T = \tau$, получаем

$$20 \lg p_{\text{эф (1 м)}} + 20 \lg (R_{\text{э}}/2) - 20 \lg k_{\delta} - 20 \lg p_{\text{п.с}} + 20 \lg f + \\ + 10 \lg \tau + 10 \lg \gamma - 3 = 40 \lg r + 2\beta r. \quad (5.15)$$

Правая часть выражения (5.15) есть не что иное, как потери при распространении сигнала

$$40 \lg r + 2\beta r = 2TL. \quad (5.16)$$

В общем случае потери при распространении сигнала TL выражаются через два члена $TL = TL_{\text{г}} + TL_{\text{з}}$, где $TL_{\text{г}}$ — потери за счет геометрического расширения при распространении сигнала; $TL_{\text{з}}$ — потери за счет поглощения сигнала средой (затухание). В данном случае

$$2TL_{\text{г}} = 40 \lg r; \quad (5.17)$$

$$2TL_{\text{з}} = 2\beta r. \quad (5.18)$$

В выражении (5.17) значения r берутся в метрах, в (5.18) — в километрах. При переходе к единой системе измерения r , км, выражение (5.16) принимает вид

$$2TL = 40 (3 + \lg r) + 2\beta r. \quad (5.19)$$

Уравнение (5.15) удобно решать графическим путем с использованием номограмм. Для этой цели на рис. 5.4 построены кривые потерь при распространении сигнала согласно выражению (5.9).

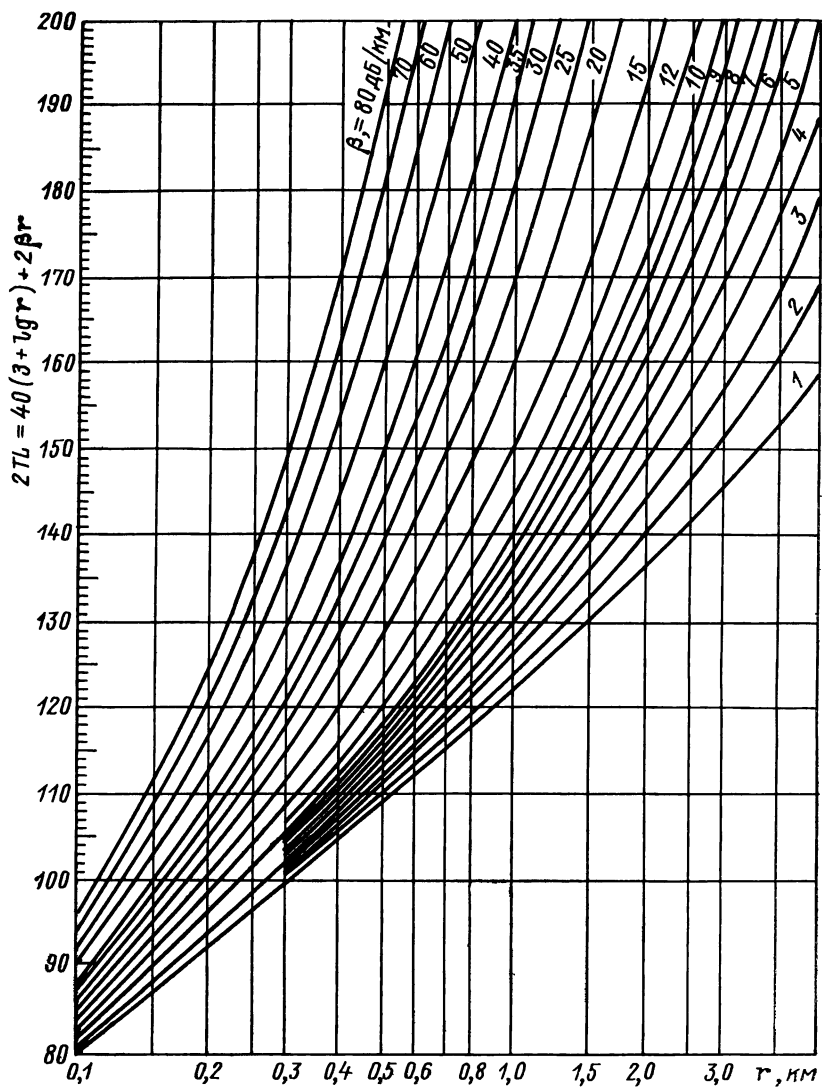


Рис. 5.4. Зависимость потерь распространения $2TL$ эхосигнала от дистанции r при различных значениях коэффициента затухания β .

Значения коэффициентов затухания β в приводимой номограмме определялись по графикам, построенным на рис. 5.2, в зависимости от рабочей частоты и температуры воды.

Для вычисления величин, входящих в левую часть уравнения (5.15), построены соответствующие номограммы, приведенные на рис. 5.5, 5.6 и 5.7.

Величина коэффициента концентрации γ определяется по номограмме рис. 5.5. Для этого проводится прямая линия через точки величин углов ширины ДН антенны на уровне 0,7 в горизонтальной $2\theta_r$ и вертикальной $2\theta_v$ плоскостях. Для примера штрихами проведена линия для $2\theta_v = 14^\circ$ и $2\theta_r = 9^\circ$ антенны гидролокатора «Прибой-101». Значения γ и $10 \lg \gamma$ отсчитываются в точке пересечения этой линии со средней шкалой номограммы. Данная номограмма построена для антенн с прямоугольной апертурой, но ею можно пользоваться (с погрешностью $\sim 4\%$) и для определения коэффициента концентрации для антенн с круглой апертурой (при этом принимается $2\theta_r = 2\theta_v = 2\theta_{\text{круг}}$).

Величина $TS = 20 \lg (R_s/2)$ (сила цели) определяется из графика рис. 5.6, на котором также приведены ориентировочные размеры L одиночных рыб в зависимости от радиуса эквивалентной сферы [96].

Величины f , τ , k_δ , $p_{\text{пс}}$, $p_{\text{эф}}$ (1 м) (в децибелах) определяются по номограмме рис. 5.7 путем непосредственного отсчета по двоянным шкалам. Для звукового давления в качестве эталонного уровня в соответствии со стандартом принят 1 мкПа.

Если неизвестно приведенное звуковое давление конкретной аппаратуры, то, пользуясь формулой (5.10), расчет можно производить, используя акустическую мощность, или, зная коэффициент звукопрозрачности обтекателя (мембраны) $\eta_{\text{зв}}$ и КПД антенны η_a , с использованием электрической мощности $W_{\text{эл}}$ аппаратуры

$$W_a = W_{\text{эл}} \eta_{\text{зв}} \eta_a. \quad (5.20)$$

Приведенная методика расчета дальности справедлива при однократном обнаружении (по одиночной посылке). В реальных условиях обнаружение промысловых объектов осуществляется за несколько посылок. При этом, как показано в § 4.3, кумулятивная вероятность обнаружения возрастает, что эквивалентно снижению значения k_δ .

Изложенный способ расчета дальности используется в организациях, разрабатывающих РПА. При введении микропроцессорной техники он легко переводится на язык ЭВМ. В некоторой степени этот способ универсален в том смысле, что с его помощью можно рассчитывать не только дальность действия, но быстро и оперативно определить любую величину, входящую в выражение (5.15), по заданным или известным заранее другим величинам, а также оперативно производить сравнительные оценки определяемых величин.

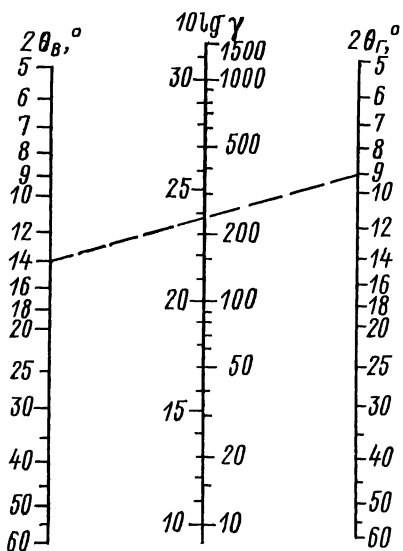


Рис. 5.5. Номограмма для определения коэффициента осевой концентрации $\gamma_{АС}$.

Рис. 5.6. Зависимость силы цели TS и размера одиночной рыбы L от радиуса эквивалентной сферы $R_э$.

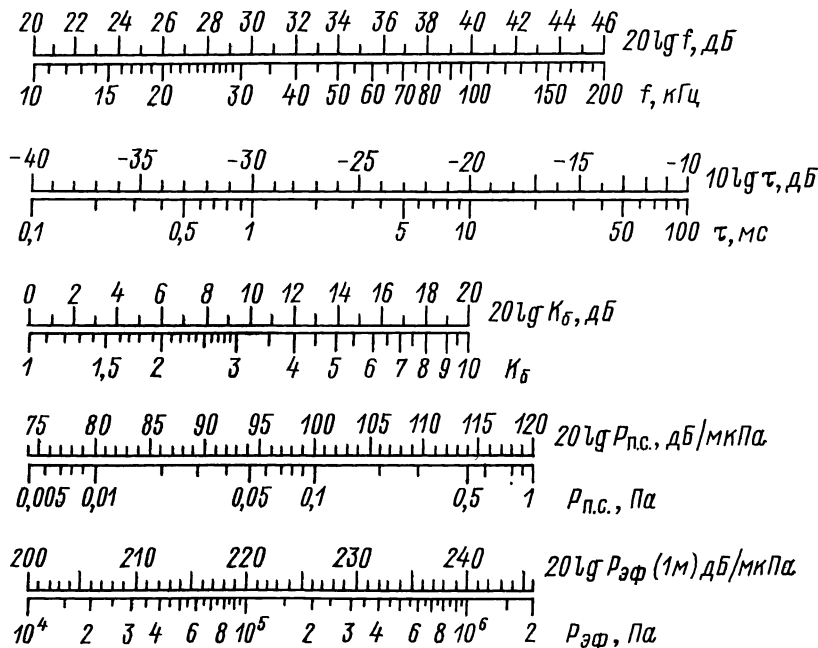
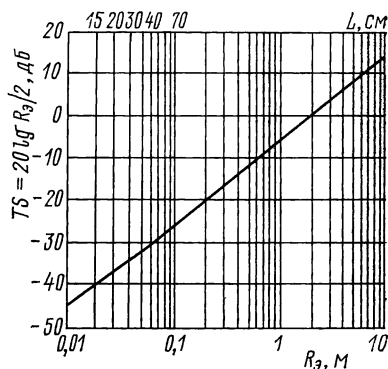


Рис. 5.7. Номограммы для перевода параметров РПА в децибелы.

f — рабочая частота; τ — длительность излучаемого импульса; k — коэффициент надежности приема; $P_{п.с}$ — суммарный уровень помех, приведенный к стандартным условиям; $P_{эф}$ — эффективное значение звукового давления излучателя.

§ 5.4. Расчет дальности в условиях реверберационной помехи

Реверберационная помеха существенно ограничивает дальность действия РПА. Различают три основных типа реверберации: объемную, поверхностную и донную [62, 63]. Рассмотрим особенности расчета дальности действия РПА при наличии реверберации. Исходное уравнение гидролокатора в условиях реверберационной помехи записывается в виде [96]

$$TS - TS' \geq DT, \quad (5.21)$$

где TS — сила цели объекта поиска, дБ; TS' — сила цели реверберации, дБ; DT — порог обнаружения, дБ.

Сила цели TS оценивается эквивалентным радиусом цели R_0

$$TS = 20 \lg (R_0/2). \quad (5.22)$$

Величина R_0 в реальных условиях может быть самой различной в зависимости от объекта локации. Для практических расчетов при конструировании РПА выбраны два базовых размера радиусов эквивалентных сфер: $R = 2$ м ($TS = 0$ дБ) — при лоцировании рыбных косяков и $R_0 = 0,1$ м ($TS = -26$ дБ) — при лоцировании одиночной рыбы.

Способы оценки порога обнаружения DT рассмотрены в § 4.3.

Донная реверберация оказывает относительно малое мешающее действие при вертикальном зондировании эхолотом и при работе с малыми углами наклона антенны гидролокатора. Основное влияние на дальность РПА оказывают объемная и поверхностная реверберации.

Сила цели объемной реверберации TS выражается следующим соотношением [96]:

$$TS'_V = S_V + 10 \lg (c\tau/2) + 20 \lg r + 10 \lg \psi, \quad (5.23)$$

где S_V — сила рассеивания объема воды, дБ; ψ — телесный угол, определяемый шириной ДН антенны, град; c — выражается в м/с; r — в км; τ — в с. Значение $10 \lg \psi$ для различных конфигураций антенн приведены [96] в табл. 3. Сила рассеивания S_V для поверхностных слоев составляет величину порядка минус 70 дБ, а для глубин $H = 1000$ м и более — минус 90 — минус 100 дБ.

Сделав оценку каждого слагаемого уравнения гидролокатора (5.21) в условиях объемной реверберации, строят графики в координатах сила цели—расстояние. Вариант графического решения уравнения (5.21) для гидролокатора и эхолота представлен на рис. 5.8. Точка пересечения прямых $TS-DT$ и TS'_V дает на горизонтальной оси численное значение дальности действия РПА в условиях объемной реверберации. Видно, что объемная реверберация существенно уменьшает дальность действия аппаратуры.

Поверхностная реверберация также значительно уменьшает дальность действия гидролокаторов, особенно при малых углах

Т а б л и ц а 3. Ширина эквивалентной диаграммы направленности антенн (в логарифмических единицах)

Преобразователь	$10 \lg \psi$, дБ	$10 \lg \Theta_r$, дБ
Круглый плоский в бесконечном экране с радиусом $R > 2\lambda$	$20 \lg \frac{\lambda}{2\pi R} + 7,7$	$10 \lg \frac{\lambda}{2\pi R} + 6,9$
Прямоугольный в бесконечном экране с $a, b \gg \lambda$ (a — длина стороны в горизонтальной плоскости, b — в вертикальной)	$10 \lg \frac{\lambda}{4\pi ab} + 7,4$	$10 \lg \frac{\lambda}{2\pi a} + 9,2$
Линейный длиной $l > \lambda$ (горизонтальный)	$10 \lg \frac{\lambda}{2\pi l} + 9,2$	$10 \lg \frac{\lambda}{2\pi l} + 9,2$
Ненаправленный (точечный)	$10 \lg 4\pi = 11,0$	$10 \lg 2\pi = 8,0$

наклона антенны. Сила цели поверхностной реверберации определяется выражением [96]

$$TS'_s = S_s + 10 \lg (c\tau/2) + 10 \lg r + 10 \lg 2\theta_r, \quad (5.24)$$

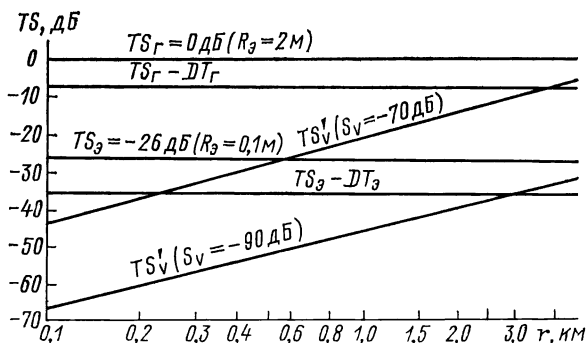


Рис. 5.8. К объяснению влияния объемной реверберации на дальность обнаружения РПА.

где S_s — сила рассеивания поверхности океана, дБ; $2\theta_r$ — ширина ДН излучателя в горизонтальной плоскости, град; значения $10 \lg 2\theta_r$ приведены в табл. 3. Величина силы рассеивания поверхности океана вычисляется по формулам

$$\left. \begin{aligned} S_s &= 3,3q \lg (\varphi/30) + 42,4 \lg q + 2,6; \\ q &= 16 (vf^{1/3})^{-0,58}, \end{aligned} \right\} \quad (5.25)$$

где φ — угол скольжения луча, град; v — скорость ветра, м/с; f — частота, кГц.

Графическое решение уравнения (5.24) аналогично предыдущему случаю. На рис. 5.9 показан вариант графического решения уравнения (5.24) для поверхностной реверберации при скоростях ветра $v=2,5$ и 5 м/с и углах наклона антенны $\varphi=5$ и 10° . Точка пересечения прямых $TS-DT$ и TS_s' дает численное значение энергетической дальности действия гидролокатора в условиях помехи от поверхностной реверберации.

Ниже даны примеры инженерных задач (с решениями) по расчету дальности действия конкретных рыбопоисковых приборов.

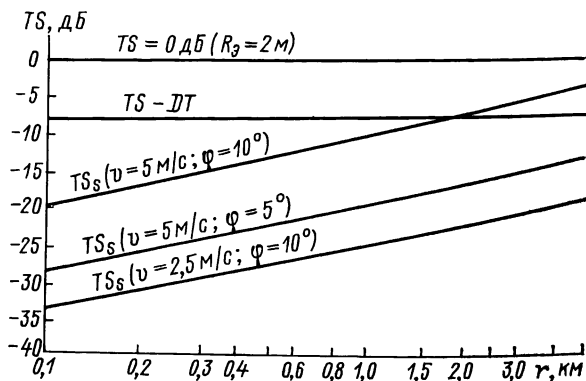


Рис. 5.9. К объяснению влияния поверхностной реверберации на дальность обнаружения РПА.

Пример 5.1. Антенна рыбопоискового гидролокатора выдвигается за обводы судна на 1 м, осадка судна 10 м. Определить геометрическую дальность действия при градиенте температуры $G_1=0,05^\circ\text{C}/\text{м}$, если объект лоцирования находится на глубине 200 м, скорость звука c_0 у поверхности составляет 1500 м/с, средняя температура в данном слое воды $T=12^\circ\text{C}$.

Решение. Как известно из основ гидроакустики, градиент скорости звука G_c связан с градиентом температуры выражением

$$G_c = (4,21 - 0,073T) G_t. \quad (5.26)$$

Для заданных условий $G_c = (4,21 - 0,073 \cdot 12) 0,05 = 0,167$.

Излучающий источник находится на глубине $H_1=1$ м + 10 м = 11 м. Геометрическая дальность действия определяется по формуле (5.2)

$$r_r = \left(\frac{2 \cdot 1,5 \cdot 10^3}{0,167} \right)^{1/2} [(11)^{1/2} + (200)^{1/2}] = 2100 \text{ м.}$$

В этом случае акустическая антенна должна быть наклонена к поверхности воды под углом α , определяемым по формуле

$$\begin{aligned} \cos \alpha &= (c_0 - G_c r) / c_0; \\ \cos \alpha &= \frac{1500 - 0,167 \cdot 12}{1500} = 0,9986, \text{ т. е. } \alpha = 2^\circ. \end{aligned} \quad (5.27)$$

Пример 5.2. Самый массовый отечественный рыбопоисковый комплекс «Прибой-101» состоит из гидролокатора и эхолота. Гидролокатор в режиме максимального обеспечения дистанции обнаружения имеет следующие технические параметры: $f=19,7$ кГц; $p_{\text{эф(1м)}}=1,84 \cdot 10^5$ Па; $\tau=10$ мс; $2\theta_r=9^\circ$; $2\theta_b=14^\circ$; $k_\sigma=$

=2. Определить его дальность действия при лоцировании рыбного косяка $R_a=2$ м при $p_{nc}=0,05$ Па и температурах воды 0 и 25 °С.

Решение. По формуле (5.15) с помощью номограмм, построенных на рис. 5.5, 5.6 и 5.7, определяем общие потери на распространение

$$2TL = 225 + 0 - 6 - 94 + 26 - 20 + 24 - 3 = 152 \text{ дБ.}$$

По заданным f и температурам воды по графику, приведенному на рис. 5.2, определяем $\beta_0=4,4$ дБ/км, $\beta_{25}=1,7$ дБ/км. По номограмме, построенной на рис. 5.4, определяем $r_0=1,9$ км, $r_{25}=3,2$ км.

Пример 5.3. По техническим параметрам гидролокатора «Прибой-101», приведенным в примере 5.2, для расчетной дальности действия $r=3$ км определить, для какой температуры воды производился расчет параметров.

Решение. С помощью полученной в примере 5.2 величины $2TL=152$ дБ и дальности действия $r=3$ км по номограмме, приведенной на рис. 5.4, определяем величину $\beta=2,2$ дБ/км. По графику, показанному на рис. 5.2, используя $\beta=2,2$ дБ/км и $f=19,7$ кГц, определяем $T=15$ °С.

Пример 5.4. В известных технических параметрах гидролокатора «Прибой-101» отсутствует параметр $p_{эф(1 м)}$. Определить необходимую энергетическую мощность $W_{эл}$ для расчетной $r=3$ км при $T=10$ °С, $\eta_a=0,3$, $\eta_{зв}=0,85$, $R_a=2$ м, $p_{nc}=0,05$ Па.

Решение. По заданным $T=10$ °С и $f=19,7$ кГц по графику, приведенному на рис. 5.2, определяем $\beta=3$ дБ/км. С помощью $r=3$ км и $\beta=3$ дБ/км по номограмме рис. 5.4, находим $2TL=157$ дБ. Используя формулу (5.15) и номограммы, показанные на рис. 5.5, 5.6 и 5.7, находим

$$SL = 20 \lg p_{эф(1 м)} = 157 - 0 + 6 + 94 - 26 + 20 - 24 + 3 = 230 \text{ дБ.}$$

По номограмме, приведенной на рис. 5.7, определяем $p_{эф(1 м)}=3,2 \cdot 10^5$ Па, а по номограмме, приведенной на рис. 5.5, $\gamma=230$. Затем из формулы (5.10) находим

$$W_a = \frac{p_{эф(1 м)}}{(3,46)^2 \cdot 10^4 \gamma} = \frac{10,24 \cdot 10^{10}}{12 \cdot 10 \cdot 2,3 \cdot 10} = 3,8 \text{ кВт.}$$

Зная W_a , η_a и $\eta_{зв}$, из формулы (5.20) вычисляем

$$W_{эл} = \frac{W_a}{\eta_a \eta_{зв}} = \frac{3,8}{0,3 \cdot 0,85} = 15 \text{ кВт.}$$

Пример 5.5. На какой максимальной дистанции можно лоцировать гидролокатором «Прибой-101» одиночную рыбу ($R_a=0,1$ м) при $T=10$ °С, $\tau=1$ мс, $p_{nc}=0,05$ Па.

Решение. Из примера 5.4 $\beta=3$ дБ/км. По формуле (5.15) и номограммам рис. 5.5, 5.6 и 5.7 определяем

$$2TL = 225 - 26 - 6 - 94 + 26 - 30 + 24 - 3 = 116 \text{ дБ.}$$

По номограмме рис. 5.4, используя полученные $\beta=3$ дБ/км и $2TL=116$ дБ, определяем $r=650$ м.

Пример 5.6. Рыбопоисковый эхолот «Прибой-101» в режиме максимального обеспечения глубины обнаружения имеет следующие технические параметры: $f=25,5$ кГц, $p_{эф(1 м)}=2,94 \cdot 10^5$ Па, $\tau=2,5$ мс, $\theta_{м}=5^\circ$, $\theta_{D}=10^\circ$, $k_\delta=2$. Определить глубину обнаружения одиночной рыбы с $L=70$ см при $p_{nc}=0,05$ Па и $T=4$ °С.

Решение. По номограмме рис. 5.6 определяем по известной $L=70$ см, $R_a=0,1$ м, $TS=-26$ дБ. По формуле (5.15) с помощью номограмм рис. 5.5 и 5.7 вычисляем

$$2TL = 229,5 - 26 - 6 - 94 + 28 - 26 + 28 - 3 = 130,5 \text{ дБ.}$$

По заданным $f=25,5$ кГц и $T=4$ °С по графику рис. 5.2 определяем $\beta=6$ дБ/км. По номограмме рис. 5.4 находим $r=950$ м.

Пример 5.7. Рыбопоисковый эхолот «Сарган-Э» имеет следующие технические параметры: $f=20$ кГц, $p_{эф(1 м)}=1,1 \cdot 10^5$ Па, $\tau=10$ мс, $2\theta_{кр\text{уг}}=14^\circ$, $k_\delta=2$. Определить, какой длины обнаруживает эхолот одиночную рыбу на глубине $r=600$ м при $p_{пс}=0,05$ Па и $T=4^\circ\text{C}$.

Решение. По заданным $f=20$ кГц и $T=4^\circ\text{C}$ по графику рис. 5.2 определяем $\beta=3,7$ дБ/км. По номограмме рис. 5.4, используя $\beta=3,7$ дБ/км и $r=600$ м, находим $2TL=115$ дБ. Затем из формулы (5.15) и номограмм рис. 5.5 и 5.7 вычисляем

$$TS = 20 \lg (R_{\text{э/2}}) = 115 - 221 + 6 + 94 - 26 + 20 - 22 + 3 = -31.$$

По номограмме рис. 5.6 определяем $L=40$ см.

Пример 5.8. Эхолот имеет следующие технические параметры: $f=15$ кГц, $p_{эф(1 м)}=6,2 \cdot 10^5$ Па, $\tau=16$ мс, $k_\delta=2$, антенна плоская с круглой апертурой. Определить ширину ДН антенны, если эхолот лоцирует одиночную рыбу $R_0=0,1$ м при $p_{пс}=0,05$ Па и $T=4^\circ\text{C}$ на глубине $r=2$ км.

Решение. По известным $f=15$ кГц и $T=4^\circ\text{C}$ по графику рис. 5.2 определяем $\beta=2,2$ дБ/км. Используя $\beta=2,2$ дБ/км и $r=2$ км по номограмме рис. 5.4 находим $2TL=141$ дБ. Из выражения (5.15) с помощью номограмм рис. 5.6 и 5.7 определяем

$$10 \lg \gamma = 141 - 236 + 26 + 6 + 94 - 23,8 + 17 + 3 = 27,2 \text{ дБ.}$$

По номограмме рис. 5.5 находим $2\theta_{кр\text{уг}}=7,5^\circ$.

Пример 5.9. Рыбопоисковый эхолот, производящий лоцирование одиночной рыбы с $R_0=0,1$ м на глубине $r=2$ км, имеет следующие технические параметры: $f=15$ кГц, $\tau=8$ см, $k_\delta=2$, $\eta_a=0,7$, $\eta_{\text{ав}}=0,9$, $2\theta_{кр\text{уг}}=7,5^\circ$. Температура воды на поверхности $T_1=15^\circ\text{C}$ постепенно уменьшается и на глубине $r_1=0,5$ км равна $T_2=4^\circ\text{C}$, затем остается постоянной до глубины 2 км, т. е. $r_2=1,5$ км, $p_{пс}=0,05$ Па. Сравнить электрические мощности эхолота $W_{\text{эл}}$ без учета влияния гидростатического давления и изменения температуры воды при $T=4^\circ\text{C}$ и с учетом этих влияний.

Решение. По известным $f=15$ кГц, $T_1=15^\circ\text{C}$ и $T_2=4^\circ\text{C}$ по графику рис. 5.2 определяем $\beta_1=1,3$ дБ/км, $\beta_2=2,2$ дБ/км. Записав формулу (5.19) для $T_2=4^\circ\text{C}$ в виде

$$2TL_1 = 40 [3 + \lg (r_1 + r_2)] + 2\beta_2 (r_1 + r_2),$$

получим

$$2TL_1 = 40 [3 + \lg (0,5 + 1,5)] + 2 \cdot 2,2 (0,5 + 1,5) = 140,8 \text{ дБ,}$$

а для $T_1=15^\circ\text{C}$ и $T_2=4^\circ\text{C}$ формула (5.19) примет вид

$$2TL_2 = 40 [3 + \lg (r_1 + r_2)] + 2\beta_3 r_1 + 2\beta_4 r_2,$$

где $\beta_3 = (\beta_1 + \beta_2)/2 = (1,3 + 2,2)/2 = 1,75$ дБ/км; $\beta_4 = \beta_2 k_{p \text{ ср}} = 2,2 \cdot 0,933 = 2$ дБ/км.

$k_{p \text{ ср}}$ определяется по графику рис. 5.3 для глубины 2 км.

Тогда получим

$$2TL_2 = 40 [3 + \lg (0,5 + 1,5)] + 2 \cdot 1,75 \cdot 0,5 + 2 \cdot 2 \cdot 1,5 = 139,75 \text{ дБ.}$$

Из формулы (5.15) с помощью номограмм рис. 5.5, 5.6 и 5.7 определяем

$$SL_1 = 20 \lg p_{эф(1 м)2} = 140,8 + 26 + 6 + 94 - 23,7 + 21 - 27,5 + 3 = 239,6 \text{ дБ;}$$

$$SL_2 = 20 \lg p_{эф(1 м)1} = 139,75 + 26 + 6 + 94 - 23,7 + 21 - 27,5 + 3 = 238 \text{ дБ.}$$

По номограмме рис. 5.7 находим $p_{эф(1 м)1} = 9,5 \cdot 10^5$ Па, $p_{эф(1 м)2} = 8 \times 10^5$ Па.

Из формулы (5.10)

$$W_a = \frac{p_{эф(1 м)}}{(3,46)^2 \cdot 10^4 \gamma}.$$

Значение γ определяется по номограмме рис. 5.5. Тогда имеем

$$W_{a1} = \frac{90,25 \cdot 10^{10}}{12 \cdot 10^4 \cdot 5,5 \cdot 10^2} = 13,7 \text{ кВт}; \quad W_{a2} = \frac{64 \cdot 10^{10}}{12 \cdot 10^4 \cdot 5,5 \cdot 10^2} = 9,7 \text{ кВт}.$$

Из формулы (5.20)

$$W_{\text{эл}} = W_a / (\eta_a \eta_{\text{эв}}); \quad W_{\text{эл}1} = 13,7 / (0,7 \cdot 0,9) = 21,75 \text{ кВт}; \\ W_{\text{эл}2} = 9,7 / (0,7 \cdot 0,9) = 15,4 \text{ кВт}.$$

Отношение мощностей равно

$$n = W_{\text{эл}1} / W_{\text{эл}2} = 21,75 / 15,4 = 1,4 \text{ раза}.$$

Пример 5.10. Рыбопоисковый гидролокатор с техническими параметрами: $f=20$ кГц, $p_{\text{эф}}(1 \text{ м})=5,4 \cdot 10^5$, $\tau=24$ мс, $2\theta_{\text{кр}}=7,5^\circ$ лоцирует рыбные скопления с $R_0=2$ м при $p_{\text{пс}}=0,05$ Па и $T=4^\circ\text{C}$ на дистанции $r=3,5$ км. Определить его порог обнаружения DT .

Решение. По заданному $f=20$ кГц и $T=4^\circ\text{C}$ по графику рис. 5.2 определяем $\beta=3,7$ дБ/км. С помощью $\beta=3,7$ дБ/км и $r=3,5$ км по номограмме рис. 5.4 находим $2TL=173$ дБ. Из выражения (5.15) с помощью номограмм рис. 5.5, 5.6 и 5.7 определяем

$$20 \lg k_\delta = 234,8 + 0 - 94 + 26 - 16 + 27,5 - 3 - 173 = 2,3 \text{ дБ}.$$

По номограмме рис. 5.7 находим $k_\delta=1,37$. Из выражения $\delta = (2/\Delta f T)^{1/2}$, так как для РПА $\Delta f T=1$, определяем $\delta=1,41 \cdot 1,37=2$, а по выражению (4.5)

$$DT = 20 \cdot 0,3 = 6 \text{ дБ}.$$

Пример 5.11. Рыбопоисковый комплекс состоит из гидролокатора, имеющего плоскую антенну с круглой апертурой с $R_r=0,36$ м, $\tau=24$ мс и $r_r=3$ км по $TS=0$ дБ, и эхолота, имеющего плоскую антенну с круглой апертурой с $R_0=0,42$ м, $\tau=8$ мс и $r_0=2$ км по $TS_0=-26$ дБ. Определить, ограничиваются ли дальности действия комплекса объемной реверберацией при $DT_r=7$ дБ, $DT_0=9$ дБ.

Решение. Решение данного примера производится графически, используя основное уравнение гидролокатора (5.21)

$$TS - TS'_v \geq DT.$$

В нашем случае TS , DT заданы. TS'_v для текущих значений r определяются выражением (5.23), предварительно требуется найти из табл. 3 выражение для $10 \lg \psi$ по заданным радиусам антенны, а S'_v принимаются: для гидролокатора $S_{vr}=-70$ дБ, для эхолота $S_{v0}=-90$ дБ. Затем на графике строятся полученные зависимости TS , $TS-DT$ и TS'_v . Для данного примера эти зависимости построены на рис. 5.8. Из графиков следует, что объемная реверберация начинает ограничивать дальности действия комплекса: для гидролокатора, начиная с $r > 3,5$ км (точка пересечения TS_r-DT_r и TS'_{vr}), для эхолота, начиная с $r > 2,8$ км (точка пересечения TS_0-DT_0 и TS'_{v0}).

Пример 5.12. Для гидролокатора с параметрами $f=20$ кГц, $R_r=0,36$ м, $\tau=24$ мс и $r=3$ км определить при $DT=7$ дБ, ограничивается ли его дальность действия поверхностной реверберацией при скоростях ветра $v_1=2,5$ м/с и $v_2=5$ м/с и углах скольжения гидроакустического луча $\varphi_1=5^\circ$, $\varphi_2=10^\circ$.

Решение. Данный пример решается графическим построением выражения (5.21)

$$TS - TS'_v \geq DT.$$

Для текущих значений r определяется выражением (5.24), предварительно требуется найти из табл. 3 выражение для $10 \lg 20r$ по заданному $R_r=0,36$ м и значению S_s по выражению (5.25). Затем на графике строятся зависимости TS , $TS-DT$ и TS'_s . Для данного примера эти зависимости в сочетании $v_2=5$ м/с и $\varphi_2=10^\circ$, $v_2=5$ м/с и $\varphi_1=5^\circ$, $v_1=2,5$ м/с и $\varphi_2=10^\circ$ построены на рис. 5.9. Из анализа графика рис. 5.9 следует, что поверхностная реверберация при $v_2=5$ м/с и $\varphi_2=10^\circ$ ограничивает дальность действия гидролокатора, начиная уже с 1,7 км (точка пересечения $TS-DT$ и TS'_s при $v_2=5$ м/с и $\varphi_2=10^\circ$). Но это наихудшее сочетание, гидролокаторы практически не работают при таких углах скольжения луча. Остальные же сочетания не ограничивают дальность действия гидролокатора.

Глава 6

ВЫБОР РАБОЧЕЙ ЧАСТОТЫ

§ 6.1. Оптимальная частота

Дальность действия РПА зависит от правильного выбора рабочей частоты. Повышение частоты, с одной стороны, способствует увеличению дальности действия за счет снижения уровня помех, с другой — приводит к уменьшению дальности из-за увеличения затухания акустических волн.

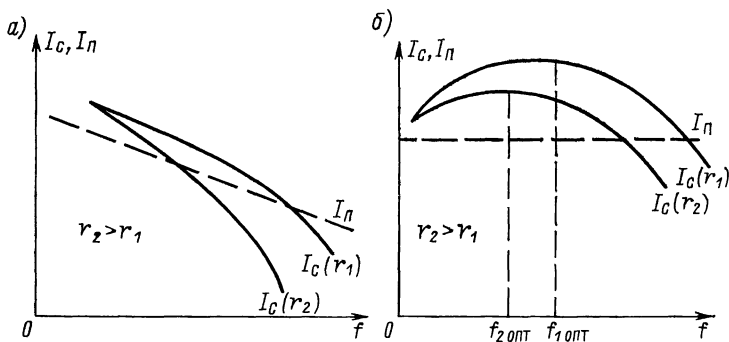


Рис. 6.1. Зависимость интенсивности сигнала I_c от рабочей частоты f : а — при изменяющейся интенсивности помехи I_n ; б — при неизменной I_n .

Спектральная плотность сигнала и помехи по-разному зависят от частоты и расстояния до цели. На рис. 6.1, а представлены зависимости интенсивностей сигнала I_c (сплошные кривые) и помехи I_n (штриховая кривая) от частоты и расстояния. Изменяя параметры аппаратуры таким образом, чтобы интенсивность принимаемой помехи с изменением частоты оставалась постоянной, график указанных зависимостей можно представить в виде, показанном на рис. 6.1, б. Из графика видно, что для определенного расстояния до цели существует значение частоты, при котором

отношение сигнал/помеха является максимальным. Такая частота называется оптимальной рабочей частотой $f_{\text{опт}}$, при которой дальность действия РПА будет наибольшей при принимаемых в расчете характеристиках цели. На оптимальной частоте для достижения заданной дальности действия требуется минимальная величина излучаемой мощности. Следовательно, оптимальная частота является функцией дальности обнаружения и определенного набора параметров среды, цели и аппаратуры [96].

Вопрос об оптимальной рабочей частоте гидроакустической аппаратуры нередко обсуждается в литературе [41, 81, 87, 99]. Но в большинстве случаев он рассматривается без учета типа используемой аппаратуры, особенностей лоцируемого объекта и сводится к определению ориентировочных формул в очень широком диапазоне частот, что само по себе теряет смысл оптимальности. Так, для гидроакустической аппаратуры активного действия чаще всего встречается формула [87] $f_{\text{опт}} \approx 39/r^{2/3}$, а для систем связи — $f_{\text{опт}} \approx 62/r^{2/3}$, где r — дальность действия аппаратуры, км.

Ниже получены формулы оптимальных частот в сравнительно узком диапазоне частот с конкретизацией зависимости от типа аппаратуры и объектов локации.

§ 6.2. Аналитический расчет оптимальной частоты

Одним из путей повышения эффективности действия гидроакустической РПА является частотная оптимизация [51] ее параметров, учитывающая совокупность частотных зависимостей спектральных характеристик сигналов и помех, акустических характеристик среды и объекта локации и частотных свойств системы обработки информации.

Аналитически оптимальная рабочая частота РПА находится следующим образом. Определяется отношение сигнал/помеха в функции от частоты с учетом эффекта системы обработки информации в приемном тракте

$$Q(f) \sim I_{\text{пор}}(f) I_c(f)/I_n(f), \quad (6.1)$$

где $I_c(f)$, $I_n(f)$ — частотные зависимости интенсивностей сигнала и помехи; $I_{\text{пор}}(f)$ — частотная зависимость интенсивности порогового сигнала (эффект системы обработки в приемном тракте). Интенсивность сигнала и помехи, а также эффект обработки гидроакустической информации в функции от частоты можно представить следующими соотношениями:

$$\left. \begin{aligned} I_c &\sim f^{m_c} \exp(-\beta_0 f^n p_c r); \\ I_n &\sim f^{m_n} \exp(-\beta_0 f^n p_n r); \\ I_{\text{пор}} &\sim f^{m_{\text{пор}}}, \end{aligned} \right\} \quad (6.2)$$

где m_c , m_{Π} — показатели степени при частоте для энергетического спектра соответственно сигнала и помехи; $m_{\text{пор}}$ — показатель степени при частоте для эффекта обработки информации приемным трактом; p_c , p_{Π} — кратность пути для сигнала и помехи; β_0 — числовой коэффициент в уравнении затухания звука в зависимости от частоты; r — расстояние.

Подставив уравнение (6.2) в (6.1), получим

$$Q(f) \sim f^m \exp(-\beta_0 f^n p r), \quad (6.3)$$

где

$$m = m_c - m_{\Pi} + m_{\text{пор}}; \quad p = p_c - p_{\Pi}. \quad (6.4)$$

Для нахождения оптимальной частоты $f_{\text{опт}}$ продифференцируем и приравняем нулю уравнение (6.3), откуда получаем аналитическое выражение для $f_{\text{опт}}$:

$$f_{\text{опт}} = (4,34 m / n \beta_0 p r)^{1/n}, \quad (6.5)$$

где n — показатель степени при частоте в формуле для коэффициента затухания. Произведя количественную оценку членов, входящих в выражение (6.5), сможем получить формулы $f_{\text{опт}}$ для разных режимов работы гидролокатора, эхолота и систем связи.

Выражение для интенсивности сигнала при лоцировании по локальной цели без учета затухания звука равно [87]

$$I_c = W_a \gamma R_s^2 / 16 \pi r^4,$$

где коэффициент концентрации $\gamma = 4\pi S / \lambda^2 = 4\pi S f^2 / c^2$, т. е. $\gamma \sim f^2$.

Следовательно, $I_c(f) \sim f^2$ и $m_c = 2$.

Выражение для интенсивности помехи $I_{\Pi} = I_{\text{по}} \Delta f / f^2 \gamma$ содержит частотно-зависимый член полосы пропускания приемного тракта до детектора $\Delta f = \Delta f_{\text{н.г}} + \Delta f_{\tau} + \Delta f_{\text{д}}$; $\Delta f \sim \Delta f_{\text{д}} \sim f$, где $\Delta f_{\text{н.г}}$ — полоса пропускания за счет нестабильности генератора (от частоты не зависит); $\Delta f_{\tau} \approx 1/\tau$ — полоса пропускания за счет длительности излучаемого импульса (от частоты не зависит); $\Delta f_{\text{д}} = 4f(v_c - v_{\Pi})/c$ — полоса пропускания за счет эффекта Доплера; $(v_c - v_{\Pi})$ — разность скоростей взаимного движения источника сигнала и цели.

Для эхолота эффект Доплера можно не учитывать, и тогда $\Delta f \sim f^2$.

С учетом того, что $\gamma \sim f^2$ имеем: для гидролокатора $I_{\Pi} \sim f^{-3}$ и $m_{\Pi} = -3$; для эхолота $I_{\Pi} \sim f^{-4}$ и $m_{\Pi} = -4$.

Величина показателя степени порогового сигнала $I_{\text{пор}}$ зависит от эффекта обработки сигнала в приемном тракте $(\Delta f T)^{1/2} \sim f^{1/2}$, где T — время усреднения сигнала (от частоты не зависит).

Согласно изложенному: для гидролокатора $I_{\text{пор}} \sim f^{0,5}$ и $m_{\text{пор}} = 0,5$; для эхолота $I_{\text{пор}} \sim f^0$ и $m_{\text{пор}} = 0$.

В случае применения сложных сигналов и специальных устройств обработки сигналов (корреляторов, накопителей и т. п.) величина $m_{\text{пор}}$ может принимать другие значения.

Подставляя найденные значения в выражение (6.4) и учитывая, что кратность пути в активной гидролокации для сигнала $p_c=2$, а для помехи $p_n=0$, при лоцировании локальной цели получим:

для гидролокатора $m=2-(-3)+0,5=5,5$, $p=2-0=2$, тогда

$$f_{г. опт} = (11,9/n\beta_0 r)^{1/n}; \quad (6.6)$$

для эхолота $m=2-(-4)+0=6$, $p=2-0=2$, тогда

$$f_{э. опт} = (13/n\beta_0 r)^{1/n}. \quad (6.7)$$

Для случая связи по гидроакустическому каналу, например, в системах контроля орудий лова, $p_c=1$, $p_n=0$, тогда $p=1-0=1$. Поскольку эффект Доплера не влияет на данный режим работы, формула (6.5) запишется в виде

$$f_{с. опт} = (26/n\beta_0 r)^{1/n}. \quad (6.8)$$

В случае эхолотирования других объектов, отличающихся от локальных целей, например, рассредоточенных мелких групповых целей, показатель степени m может принимать другие значения, отличные от вышеприведенных.

Так, при поиске протяженных рыбных скоплений, с учетом особенностей отражающей их способности, уровень эхосигнала определяется выражением (без учета затухания)

$$I_c = W_a \gamma \sigma / (4\pi)^2 r^4,$$

где σ — акустическое поперечное сечение рассеяния групповой цели. В этом случае [109]

$$\sigma = \frac{\pi}{8} \psi 2\theta_r 2\theta_v c \tau r^2 \rho \sigma_0, \quad (6.9)$$

где ψ — коэффициент заполнения озвученного объема; $c\tau$ — протяженность импульса в воде; ρ — плотность скопления; σ_0 — акустическое сечение одиночного объекта промысла; $2\theta_r$, $2\theta_v$ — ширина диаграммы направленности антенны в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Известно, что $2\theta_r = k\hat{f}/cd_r$ и $2\theta_v = k\hat{f}/cd_v$, где k — коэффициент пропорциональности; d_r , d_v — горизонтальный и вертикальный размеры антенны.

В пределах частотного диапазона работы гидроакустической РПА по многочисленным экспериментальным данным можно считать σ_0 , чаще всего не зависящим от частоты. Остальные члены в уравнении (6.9) также от частоты не зависят.

Таким образом, в случае эхолокации протяженных рыбных скоплений (групповых целей) $\sigma \sim \hat{f}^2$, а $I_c \sim \hat{f}^2 \hat{f}^2 = \hat{f}^4$ и $m_c=4$. В результате чего $m_p = m_c - m_n + m_{пор} = 4 - (-3) + 0,5 = 7,5$, а формула оптимальной частоты для лоцирования групповых целей примет вид

$$f_{гр. опт} = (16,25/n\beta_0 r)^{1/n}. \quad (6.10)$$

Сравнение (6.6) с (6.10) показывает, что в случае локации протяженных косяков рыбы рабочая частота несколько выше, чем при лоцировании локальных целей.

Расчет параметров эхолота в рыбопоисковой аппаратуре производится при условии его работы по одиночной цели. В этом случае формула (6.7) остается в силе и для рыбопоисковых эхолотов.

Пространственное затухание звука в воде β значительно изменяется в диапазоне рабочих частот аппаратуры и зависит от многих факторов [12, 98], но для данного вывода с допустимой для расчетов точностью можно принять определенную аппроксимацию его значений. Так, в диапазоне частот от 20 Гц и приблизительно до 100 кГц эту аппроксимацию можно записать в виде [87] $\beta = \beta_0 f^n = 0,036 f^{3/2}$.

Тогда формулы (6.6), (6.7), (6.8) и (6.10) окончательно принимают вид

$$f_{г. \text{ опт}} = 36,6/r^{2/3}; \quad (6.11)$$

$$f_{э. \text{ опт}} = 38,7/r^{2/3}; \quad (6.12)$$

$$f_{с. \text{ опт}} = 61,3/r^{2/3}; \quad (6.13)$$

$$f_{гр. \text{ опт}} = 45/r^{2/3}, \quad (6.14)$$

где расстояние r измеряется в км.

Для более точного вычисления оптимальной частоты, если заранее задан или известен приблизительно допустимый диапазон рабочих частот или на основании практики определяется ориентировочный диапазон частот в зависимости от заданной дальности действия аппаратуры, частотную зависимость затухания звука в воде можно выбирать более точную в заданных диапазонах, пользуясь табл. 4.

Приведенные сведения и конкретные параметры отечественных и зарубежных рыбопоисковых приборов (см. табл. 2) позволяют оценить, насколько выбранные частоты РПА близки к оптимальным.

Ниже даны численные примеры расчета оптимальной частоты различных рыбопоисковых приборов.

Пример 6.1. Сравнить оптимальные рабочие частоты гидролокаторов для обнаружения локальных целей и рыбных скоплений на дистанции $r=3$ км.

Решение. Ориентировочно рабочие частоты согласно формулам (6.11) и (6.14) или из опыта проектировщика будут лежать в пределах 5—20 кГц. По уточненным формулам табл. 4 в диапазоне частот 5—20 кГц определяем: для локальных целей

$$f_{г. \text{ опт}} = 24,4/\sqrt[3]{3} = 14,3 \text{ кГц};$$

для рыбных скоплений

$$f_{гр. \text{ опт}} = 28,6/\sqrt[3]{3} = 17 \text{ кГц}.$$

Т а б л и ц а 4. Формулы для расчета оптимальных рабочих частот РПА для различных целей

Диапазон частот	20—300 Гц	350 Гц—1,2 кГц	1,5—4,5 кГц	5—20 кГц	25—50 кГц	55—100 кГц
Закон затуха- ния $\beta = \beta_0 f^n$	$\beta = 0,08 f^2$	$\beta = 0,038 f^2$	$\beta = 0,0173 f^2$	$\beta = 0,01 f^2$	$\beta = 0,0064 f^2$	$\beta = 0,0045 f^2$
Общие формулы	Уточненные формулы $f_{г. опт}$, $f_{э. опт}$, $f_{с. опт}$, $f_{гр. опт}$					
$f_{г. опт} = \left(\frac{11,9}{n\beta_0 r} \right)^{1/n}$	$\frac{8,6}{\sqrt{r}}$	$\frac{12,5}{\sqrt{r}}$	$\frac{18,5}{\sqrt{r}}$	$\frac{24,4}{\sqrt{r}}$	$\frac{30,5}{\sqrt{r}}$	$\frac{36,3}{\sqrt{r}}$
$f_{э. опт} = \left(\frac{13}{n\beta_0 r} \right)^{1/n}$	$\frac{9}{\sqrt{r}}$	$\frac{13,1}{\sqrt{r}}$	$\frac{19,4}{\sqrt{r}}$	$\frac{25,5}{\sqrt{r}}$	$\frac{31,8}{\sqrt{r}}$	$\frac{38,1}{\sqrt{r}}$
$f_{с. опт} = \left(\frac{26}{n\beta_0 r} \right)^{1/n}$	$\frac{12,8}{\sqrt{r}}$	$\frac{18,5}{\sqrt{r}}$	$\frac{27,4}{\sqrt{r}}$	$\frac{36}{\sqrt{r}}$	$\frac{45}{\sqrt{r}}$	$\frac{53,7}{\sqrt{r}}$
$f_{гр. опт} = \left(\frac{16,25}{n\beta_0 r} \right)^{1/n}$	$\frac{10,15}{\sqrt{r}}$	$\frac{14,6}{\sqrt{r}}$	$\frac{21,7}{\sqrt{r}}$	$\frac{28,6}{\sqrt{r}}$	$\frac{35,6}{\sqrt{r}}$	$\frac{42,5}{\sqrt{r}}$

Пример 6.2. Определить оптимальную рабочую частоту для гидроакустического канала связи системы контроля параметров орудий лова для дистанции $r=4$ км.

Решение. По формуле (6.13) определяем ориентировочную частоту

$$f_{с. опт} = 61,3/\sqrt[3]{r^2} = 61,3/\sqrt[3]{4^2} = 24,4 \text{ кГц.}$$

Затем по уточненной формуле табл. 4 для диапазона частот 20—50 кГц находим

$$f_{с. опт} = 45/\sqrt{r} = 45/\sqrt{4} = 22,5 \text{ кГц.}$$

Пример 6.3. Определить оптимальную рабочую частоту эхолота для лоцирования разреженных биологических скоплений (к примеру, криля) на глубине 500 м.

Решение. Так как в данном случае эхолотом необходимо лоцировать разреженные рыбные скопления, то выражение (6.5) с учетом (6.9) не будет соответствовать (6.7), а необходимо получить новое выражение. В этом случае для эхолота $m=8$, а не 6, как приведено в § 6.2. Тогда получим выражение

$$f_{эс. опт} = (17,36/n\beta_0 r)^{1/n}, \quad (6.15)$$

а с учетом $\beta=0,036f$

$$f_{эс. опт} = 49,5/\sqrt[3]{r^2} = 49,5/0,63 = 78,5 \text{ кГц.} \quad (6.16)$$

Для сравнения найдем $f_{э. опт}$ для той же глубины при лоцировании одиночной рыбы

$$f_{э. опт} = 38,1/\sqrt{0,5} = 54 \text{ кГц.}$$

Глава 7

ПАРАМЕТРЫ АППАРАТУРЫ В РЕЖИМЕ ИЗЛУЧЕНИЯ

§ 7.1. Характеристики направленности антенн

Практически все антенны, применяемые в РПА, относятся к классу интерференционных [81].* В таких антеннах поле излучения формируется в результате интерференции акустических волн, проходящих в точку наблюдения от различных участков колеблющейся поверхности антенны. При этом различают ближнюю зону дифракции акустического поля (прожекторную зону или зону Френеля) и дальнюю зону (зону сферического расхождения или зону Фраунгофера).

В ближней прожекторной зоне дифракции величина звукового давления сильно флуктуирует между минимальным и максимальным значениями, фронт волны квазиплоский, размер звукового пучка примерно соответствует размеру антенны [60]. Количество переходов от минимума до максимума зависит при этом от волновых размеров антенны. В качестве примера на рис. 7.1 показано распределение модуля акустического давления на оси круглого поршневого излучателя (в бесконечном экране) с радиусом $R=$

* Параметрические антенны РПА рассмотрены в § 7.8.

$= 2,5\lambda$. В пределах зоны Френеля при отклонении от оси излучателя распределение акустического давления существенно изменяется [34, 95]. Сложная структура ближнего поля не позволяет использовать ее для поиска объектов.

Считается [11, 25, 60, 95], что длина ближней прожекторной зоны ограничивается расстоянием

$$l_d = ka^2/2, \quad (7.1)$$

где $k = 2\pi/\lambda = \omega/c$ — волновое число; a — размер апертуры (полуширина, радиус) излучателя. Величину l_d называют длиной области (расстоянием) дифракции (ширина пучка на расстоянии l_d

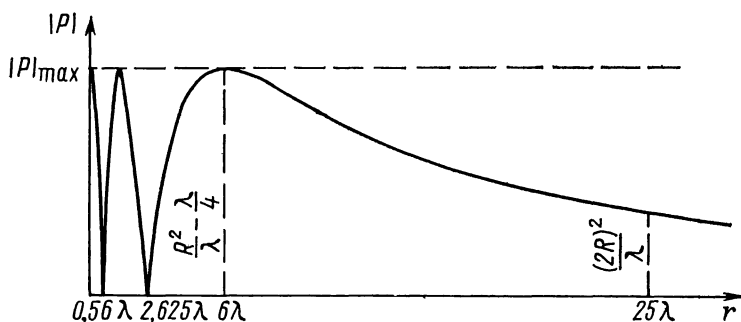


Рис. 7.1. Распределение модуля звукового давления на оси круглого поршневого излучателя.

увеличивается в $\sqrt{2}$ раз) [60]. Начиная с этого расстояния, амплитуда звукового давления изменяется пропорционально $1/r$ (закон сферического расхождения), а разность фаз акустических колебаний, приходящих в точку наблюдения от элементарных участков поверхности антенны, напротив, зависит только от угловых координат точки наблюдения и не зависит от расстояния r . Для цилиндрических антенн, получивших значительное распространение в РПА, переход к дальней зоне при $d = 2a > 10\lambda$ происходит [11] при $r \geq 10d$.

Направленные свойства антенны в дальнем поле принято описывать характеристикой направленности (ХН), представляющей собой зависимость звукового давления (или интенсивности) акустических колебаний от направления в пространстве. Эта зависимость $D(\varphi, \theta)$ является комплексной функцией направления, задаваемого азимутальным углом φ и углом места θ , и представляет собой отношение звукового давления (или интенсивности), развиваемого антенной в текущем направлении $A(r, \varphi, \theta)$, к давлению (или интенсивности) $A(r, \varphi_1, \theta_1)$ в некотором фиксированном направлении φ_1, θ_1 на одинаковых расстояниях r от центра антенны

$$D_n(\varphi, \theta) = A(r, \varphi, \theta)/A(r, \varphi_1, \theta_1) = R(\varphi, \theta) \exp[ip(\varphi, \theta)]. \quad (7.2)$$

В качестве фиксированного обычно используется направление, в котором величина давления (или интенсивности) принимает максимальное значение. Функцию $R(\varphi, \theta)$, являющуюся модулем ХН, называют амплитудной ХН, функцию $\rho(\varphi, \theta)$ — фазовой ХН.

Наибольшее применение на практике получила амплитудная ХН. Графически она изображается в виде некоторой поверхности, называемой пространственной диаграммой направленности (ДН).

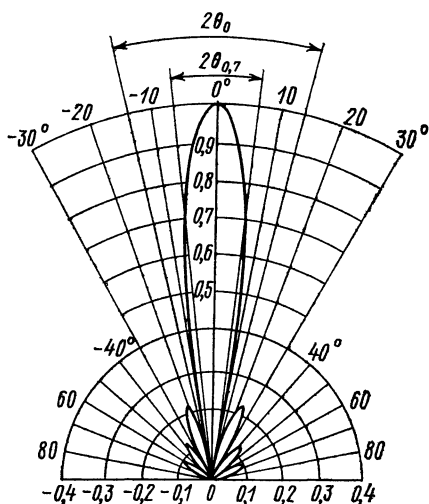


Рис. 7.2. ДН по давлению в полярной системе координат прямоугольного поршня с размером стороны $2a = 4\lambda$.

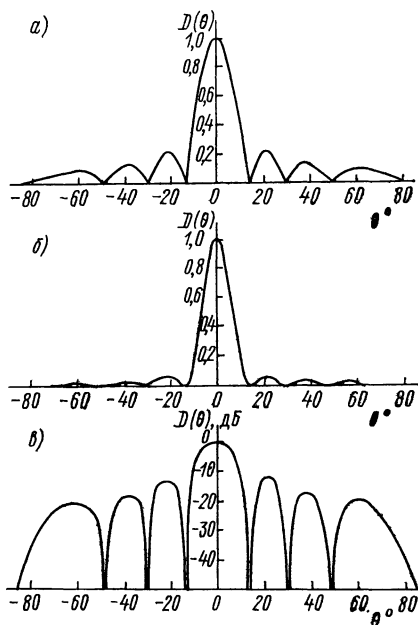


Рис. 7.3. ДН прямоугольного поршня ($2a = 4\lambda$) в прямоугольной системе координат: а — по давлению в линейном масштабе; б — по интенсивности в линейном масштабе; в — по давлению или интенсивности в логарифмическом масштабе.

При проектировании РПА и измерениях параметров направленности гидроакустических антенн обычно пользуются плоскостными диаграммами направленности, представляющими собой сечения пространственной ДН. В большинстве случаев эти сечения соответствуют плоскостям, проходящим через какую-либо ось симметрии антенны, при равенстве нулю одного из углов φ или θ .

Диаграммы направленности могут изображаться как в полярной, так и в прямоугольной системах координат. Пример построения ДН по давлению в полярной системе координат для прямоугольного поршня с размером стороны $2a = 4\lambda$, представлен на рис. 7.2. Можно считать, что основная доля излучения сосредоточена в пределах угла $2\theta_0$. Этот участок ДН называется основ-

ным максимумом или основным лепестком ДН, а угол $2\theta_0$ — шириной основного максимума. Остальная часть ДН является боковым полем или ореолом и состоит из дополнительных максимумов или лепестков. Количество, величины и направления этих лепестков зависят от волновых размеров и формы антенны.

Для оценки разрешающей способности антенны по углу принято использовать угол между двумя точками основного максимума с уровнями 0,707 для ДН, построенной по давлению, или с уровнями 0,5 — по интенсивности. Для примера, приведенного на рис. 7.2, этот угол соответствует углу $2\theta_{0,7}$.

Диаграммы направленности уже рассмотренного прямоугольного поршня, но построенные в прямоугольной системе координат, приведены на рис. 7.3. Для рис. 7.3, а, б по оси амплитуд использован линейный масштаб, для рис. 7.3, в — логарифмический. Из сравнения графиков следует, что использование линейного масштаба для ДН по интенсивности (см. рис. 7.3, б) нецелесообразно, так как снижается наглядность изображения бокового поля антенны. При построении ДН в логарифмическом масштабе (см. рис. 7.3, в) наглядно и более точно оценивается величина и направление дополнительных максимумов. ДН по давлению и по интенсивности в этом случае совпадают.

При проектировании РПА нередко требуется произвести грубую оценку направленных свойств различных вариантов антенн. Для плоской круглой антенны с равномерным распределением амплитуды можно воспользоваться приближенными формулами [64]

$$2\theta_{0,7} = 60^\circ \lambda / 2a \quad \text{и} \quad 2\theta_0 = 140^\circ \lambda / 2a, \quad (7.3)$$

соответственно для плоской прямоугольной антенны

$$2\theta_{0,7} = 50^\circ \lambda / 2a \quad \text{и} \quad 2\theta_0 = 115^\circ \lambda / 2a, \quad (7.4)$$

где $2a$ — диаметр или длина стороны соответственно для круглой или прямоугольной антенны.

Для детального расчета ДН гидроакустических антенн необходимо пользоваться специальной литературой [25, 26, 27, 64, 79, 81].

При проектировании РПА выбор ширины ДН зависит от назначения аппаратуры, требуемой разрешающей способности, рабочих диапазонов, скорости судна, наличия стабилизации антенны и других факторов [47, 64]. Часто в аппаратуре предусматривается возможность оперативного изменения ширины ДН путем коммутирования секций антенны или же используется несколько антенных трактов с различными рабочими частотами [44] (см. табл. 2).

§ 7.2. Сканирование в режиме излучения

В режимах поиска, слежения и облова рыбных объектов практически всегда необходимо обеспечивать возможно более широкие секторы обзора водного пространства. В принципе облучение

заданного сектора обзора можно осуществить одним зондирующим импульсом, используя сплошную или дискретную антенну с подобранной соответствующим образом формой излучающей поверхности. Этот вариант не всегда приемлем, так как при больших секторах обзора концентрация акустической энергии мала, а, следовательно, мала и дистанция обнаружения РПА. Облучение широких секторов обзора можно осуществлять, используя набор направленных антенн, ориентированных таким образом, чтобы ДН перекрывались на некотором заданном уровне. Однако такой способ используется редко вследствие значительного роста габаритов и стоимости акустической системы даже при небольшом количестве направлений зондирования.

В современной РПА для облучения широкого сектора водного пространства используются механические или электронные способы сканирования относительно узкой ДН гидроакустической антенны.

В простых рыбопоисковых приборах, как правило, применяются гидроакустические антенны с фиксированной относительно излучающей поверхности ориентацией ДН. Облучение широкого сектора осуществляется в этом случае путем механического разворота антенны. Разворот производится непрерывно с постоянной скоростью таким образом, чтобы за время между двумя зондирующими импульсами угловое перемещение антенны не превышало величины $2\theta_{0,7}$. Для уверенного обнаружения цели необходимо получить с ней не менее трех последовательных эхоконтактов [47, 64]. В общем случае угловая скорость разворота антенны должна быть равна

$$\omega_a = 2\theta_{0,7}c/2mL, \quad (7.5)$$

где m — количество зондирующих импульсов; L — диапазон зондирования. Согласно (7.5) при плавном развороте антенны для каждого рабочего диапазона дальности РПА существует своя оптимальная угловая скорость разворота антенны. Однако в целях упрощения конструкции привода антенны часто ограничиваются только одной или двумя скоростями разворота, одна из которых соответствует максимальному диапазону зондирования. Так, например, в гидролокаторе «Прибой-101» в режиме автоматического поиска скорости разворота составляют 0,75 и 2°/с, в гидролокаторе «Сарган-Г» — 1 и 3°/с.

Механический разворот антенны РПА может также осуществляться дискретным способом в режиме, называемом шаговым поиском. Этот режим, например, используется в большинстве норвежских гидролокаторов типа *SL*, *SB2*, *SK3* и др. Здесь излучение и прием сигналов для одного и того же направления производится при неподвижной антенне. После окончания приема эхосигналов выполняется быстрый разворот антенны на угол, называемый шагом поиска, который не должен превышать величины $2\theta_{0,7}$. При необходимости получения трех и более последовательных эхоконтактов с объектом поиска разворот антенны необхо-

1
димо осуществлять соответственно после трех и более циклов излучения—приема или путем уменьшения в это же число раз величины шага поиска.

Средняя угловая скорость разворота антенны $\omega_{\text{ш}}$ при шаговом поиске может быть определена по формуле

$$\omega_{\text{ш}} = \varphi_{\text{ш}} c / (2mL + t_{\text{в}} c), \quad (7.6)$$

где $\varphi_{\text{ш}}$ — величина шага; $t_{\text{в}}$ — время разворота антенны из одного статического положения в другое.

Существует три основных способа обзора водного пространства при использовании механического разворота антенны [117].

В первом способе сравнительно медленный разворот антенны всегда начинается из ее исходного положения по одному из бортов судна в направлении к носу судна. При достижении антенной направления на нос судна, выполняется убыстренный ее разворот до исходного направления другого борта, затем цикл повторяется в обратном направлении. Этот способ реализован в большинстве гидролокаторов фирмы «SIMRAD», например, типов *SL*, *SB2*, *SK3*, *ST*, *SQ-4*, *SU* и др., гидролокаторе *FH-103* фирмы «FURUNO» на диапазонах 800 и 1600 м и др.

Поиск по второму способу осуществляется путем непрерывного разворота антенны от одной границы сектора обзора до другой, а затем направление разворота изменяется на противоположное, например, в гидролокаторе *FH-103* на диапазонах 200 и 400 м.

Третий способ обзора отличается от второго тем, что при достижении в процессе рабочего разворота противоположной границы сектора обзора антенна с убыстренной скоростью возвращается в исходное положение т. е. обзор в пределах заданного сектора осуществляется всегда в одном направлении. Этот способ используется в отечественных гидролокаторах «Прибой-101», «Сарган-Г», гидролокаторах Mittel/Lodar, Standard-Lodar, Super-Lodar фирмы «Elac» и др.

Основными недостатками механических способов сканирования являются наличие необследуемых зон и большое время обзора [47].

От этих и других сопутствующих недостатков свободны электронные системы сканирования, применяемые в РПА одновременного секторного или кругового обзора. В аппаратуре этого типа используются многоэлементные плоские (гидролокаторы «Таймень», Atlas Fishing Sonar 950, SM600), цилиндрические (гидролокаторы «Угорь», LSS-30PET, FSS-32B, FSS-75B) или сферические антенны (гидролокатор SX200), позволяющие с помощью электронных диаграммоформирующих устройств (ДФУ) осуществлять быстрое облучение требуемого сектора обзора путем последовательного плавного или дискретного изменения ориентации ДН в пространстве.

В РПА с плоской многоэлементной антенной формирование в режиме излучения ДН в определенном направлении осуществляется путем подачи на все ее элементы набора моночастотных

радиоимпульсов, начала которых сдвинуты относительно друг друга на определенные промежутки времени. Для двух соседних элементов эквидистантной антенны величина этого сдвига Δt_{π} и набег фазы $\Delta \varphi_{\pi}$ постоянны и определяются выражениями [58, 78, 96]

$$\Delta t_{\pi} = d \sin \theta / c \quad \text{и} \quad \Delta \varphi_{\pi} = k d \sin \theta, \quad (7.7)$$

где d — расстояние между геометрическими центрами соседних элементов антенны; θ — угол между нормалью к поверхности антенны и направлением зондирования; k — волновое число. Изменение ориентации ДН в плоскости сканирования может осуществляться плавным или дискретным изменением значения величин Δt_{π} или $\Delta \varphi_{\pi}$ и очередности подачи возбуждающих сигналов на элементы антенны. В современной РПА обычно используется дискретный способ электронного сканирования ДН как более простой и обеспечивающий стабильные параметры.

У плоских многоэлементных антенн при увеличении значения угла θ ширина основного лепестка растет обратно пропорционально $\cos \theta$ (при равномерном амплитудном распределении) [54] и одновременно уменьшается уровень излучения. Опыт зарубежного [44, 118] и отечественного проектирования РПА с плоскими антеннами показывает, что выбирать угол θ больше 45° нецелесообразно.

Дальнейшее развитие система сканирования РПА с многоэлементными плоскими антеннами получила при использовании комбинации электронного сканирования в широком секторе одновременного обзора и «перешагивания» (гидролокаторы Atlas Fishing Sonar 950 и CH12) или плавного разворота антенны (гидролокатор SM600) в плоскости обзора. При использовании в устройствах отображения информации современных полупроводниковых ЗУ такая РПА приближается по тактическим параметрам к рассматриваемым ниже гидролокаторам одновременного кругового обзора, но конструктивно она проще, а с учетом возможности непрерывного слежения за целью в вертикальной плоскости до углов 90° (при использовании механического наклона антенны) обладает заметными тактическими преимуществами.

В гидролокаторах одновременного кругового обзора с цилиндрическими антеннами (см. § 2.2) часто применяется режим всенаправленного излучения, имеющий наиболее простую аппаратную реализацию (гидролокаторы «Угорь», FSS-32B, CS-30, CS-50). При необходимости увеличить максимальную дистанцию обнаружения, используют режим последовательного сканирования пространства узким акустическим лучом (гидролокатор LSS-30). Для формирования ДН в этом случае используется часть боковой поверхности цилиндрической антенны. Оптимальная угловая величина рабочего сектора (в плоскости направляющей цилиндра) составляет 120° [47, 64]. Уменьшение времени облучения обследуемого пространства достигается путем одновременного формирования нескольких ДН. Так, при величине рабочего сектора 120° возможно одновременное формирование трех ДН посредством раз-

бienia антенны на три равных цилиндрических сегмента (гидролокатор LSS-30). При подаче на все секции цилиндрического сегмента антенны синфазных возбуждающих сигналов ширина сформированной ДН сравнима по величине с рабочим сектором [64]. Для получения максимальной концентрации акустической энергии в направлении оси рабочего сектора необходимо скомпенсировать фазовые или временные сдвиги акустических колебаний, возникающие вследствие неравенства дистанций от различных точек криволинейной излучающей поверхности до какой-либо определенной точки лоцируемого пространства.

Рассмотрим схематическое изображение проекции цилиндрического сегмента антенны с величиной рабочего сектора ψ на плоскость направляющей цилиндра. Из рис. 7.4 видно, что акустические колебания, возбуждаемые всеми секциями рассматриваемого сегмента, достигают линии MN , являющейся касательной к центру сегмента, одновременно, если на все секции, кроме крайних, подавать возбуждающие сигналы с задержками, пропорциональными расстояниям от геометрических центров излучающих поверхностей этих секций до линии $A'B'$, соединяющей геометрические центры крайних секций. В этом случае временная задержка и фазовый сдвиг для произвольной секции определяются выражениями

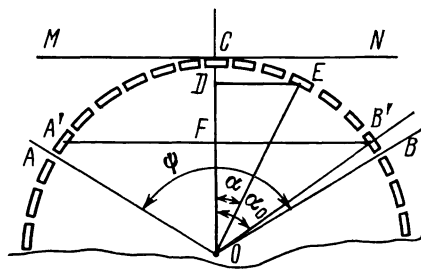


Рис. 7.4. Проекция цилиндрического сегмента цилиндрической AC на плоскость направляющей цилиндра.

$$\Delta t_{\alpha} = R(\cos \alpha - \cos \alpha_0)/c \quad \text{и} \quad \Delta \varphi_{\alpha} = kR(\cos \alpha - \cos \alpha_0), \quad (7.8)$$

где R — радиус цилиндрической излучающей поверхности; α и α_0 — углы между осью рабочего сектора и радиусами, проведенными в геометрические центры соответственно рассматриваемой и крайней секций рабочего сектора. Эти же выражения можно использовать при приведении к плоской диафрагме сегмента сферической антенны.

Вращение ДН цилиндрической антенны осуществляется шагами посредством циклического исключения из рабочего сектора крайней секции и подключения с другого края, в сторону которого должно произойти смещение ДН, следующей по порядку секции антенны. Для антенны с N вертикальными секциями величина углового смещения (шага) оси ДН составляет $360^\circ/N$.

Кроме РПА одновременного кругового обзора за рубежом на основе описанных здесь принципов сканирования ДН цилиндрических антенн и использования механического наклона антенны по углу места разработаны гидролокаторы одновременного секторного обзора с величиной сектора обзора 180° (гидролокаторы

FSS-75B, FSS-88B, FSS-164B, LSS-68, KSS-88, CS-70). Однако такие гидролокаторы имеют существенный недостаток — поисковый диапазон глубин для крайних лучей сектора обзора значительно меньше, чем для центральных лучей.

Важным параметром при электронном и механическом дискретном сканировании ДН является величина углового смещения ДН или шаг сканирования. Так, например, при величине шага сканирования, равном $2\theta_{0,7}$ (рис. 7.5, а), между соседними ДН образуются глубокие провалы, в которые может попасть объект поиска, что затрудняет принятие оператором решения о наличии цели в секторе обзора.

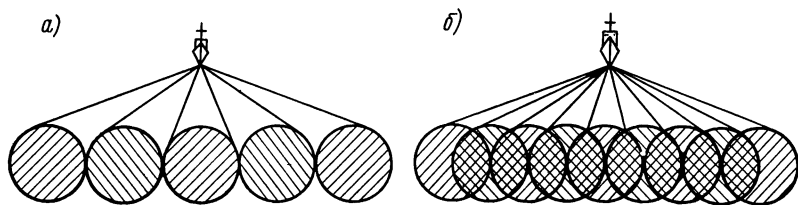


Рис. 7.5. Сечения объемов, лоцируемых сканирующим гидролокатором: а — при шаге сканирования $\varphi_{ш}=2\theta_{0,7}$; б — при шаге сканирования $\varphi_{ш}=\theta_{0,7}$.

В РПА с устройствами межцикловой обработки эхосигналов в этом случае в значительной мере ухудшается работа последних. При шаге сканирования, равном $\theta_{0,7}$, провалы между ДН практически отсутствуют (см. рис. 7.5, б), но почти в два раза возрастает время на облучение заданного сектора обзора, увеличивается мертвая зона и ухудшается точность определения дистанции. На практике выбирается компромиссный между двумя рассмотренными вариант.

Описанные способы и соответствующие им устройства электронного сканирования ДН используются также для стабилизации пространственного положения одиночной узкой ДН эхолотов при поиске рыбных объектов на больших глубинах (эхолоты «Таймень», Atlas Fishfinder 791 DS) и для электронного наклона ДН цилиндрических антенн (гидролокаторы «Угорь», LSS-30 PET, FSS-32B, CS-30, CS-50). В последнем случае каждая вертикальная секция антенны разбивается на дискретные элементы, а отклонение ДН в вертикальной плоскости производится с помощью ДФУ, аналогичных рассмотренным в § 11.4. При введении для элементов каждой вертикальной секции одинаковых временных задержек и вращении ДН в горизонтальной плоскости формируется суммарная ДН в виде «зонтика» [103]. Следует отметить, что в этом случае при увеличении угла наклона ухудшается точность пеленгования в вертикальной плоскости и снижается дальность обнаружения. Наличие электронных устройств управления углами наклона ДН позволяет ввести в гидролокаторах кругового

обзора режим шагового сканирования водного пространства в вертикальной плоскости. В этом режиме углы наклона всех ДН «зонтика» могут изменяться автоматически от посылки к посылке шагами по определенной программе (гидролокаторы CS-30 и CS-50 фирмы «Fugipio», SX200 фирмы «Simrad»).

§ 7.3. Подавление дополнительных максимумов ДН при излучении

Эффективность использования РПА в значительной степени зависит от величины боковых лепестков ДН в режиме излучения. В РПА величина акустической энергии, излучаемой в направлении объекта боковым лепестком ДН антенны, может быть достаточной для последующего уверенного приема эхосигнала аналогично сориентированным боковым лепесткам приемной ДН. В гидролокаторах в этом случае возникает большая ошибка в определении угловых координат объекта поиска, а в эхолотах при нахождении промыслового объекта в стороне от судна на индикатор или регистратор выводится ложная информация о нахождении этого объекта под килем судна.

Для иллюстрации на рис. 7.6, а приведена эхограмма участка дна Средиземного моря, полученная с помощью эхолота Schnelfrاندlot 1CO. Этот же участок дна с впадиной записан на рис. 7.6, б с помощью параметрического гидролокатора ПГЛ-5, имеющего безлепестковую ДН (см. § 7.8). Глубина места составляла 3000 м. Из сравнения эхограмм видно, что наличие боковых лепестков ДН традиционного эхолота дает иногда ложную информацию о глубине и профиле дна.

В многолучевой РПА с электронным сканированием облучение объекта поиска в каждом цикле излучения может осуществляться не только акустическим лучом, главный максимум ДН которого совпадает с направлением на этот объект, но и боковыми лепестками других лучей. Ориентация последних меняется в процессе сканирования. В результате длительность принимаемого от объекта эхосигнала может значительно возрасти, что ухудшает разрешающую способность и точность определения дистанции до объекта поиска. Величина боковых лепестков влияет на интенсивность поверхностной и донной реверберации. Все это является ограничивающими факторами при работе в мелком море и повышенном волнении, а также при поиске эхолотом рыбных объектов на банках или резких перепадах глубин.

Уровни боковых лепестков ДН зависят от волновых размеров и формы антенны, а также закона распределения амплитуд возбуждения вдоль излучающей поверхности. Так, например, теоретический уровень первого бокового лепестка ДН широко распространенных в РПА плоских антенн с круглой апертурой составляет 13 % (при равномерном амплитудном распределении), в то же время для плоской антенны с прямоугольной апертурой эта величина достигает 22 % (в нормальной плоскости, параллельной

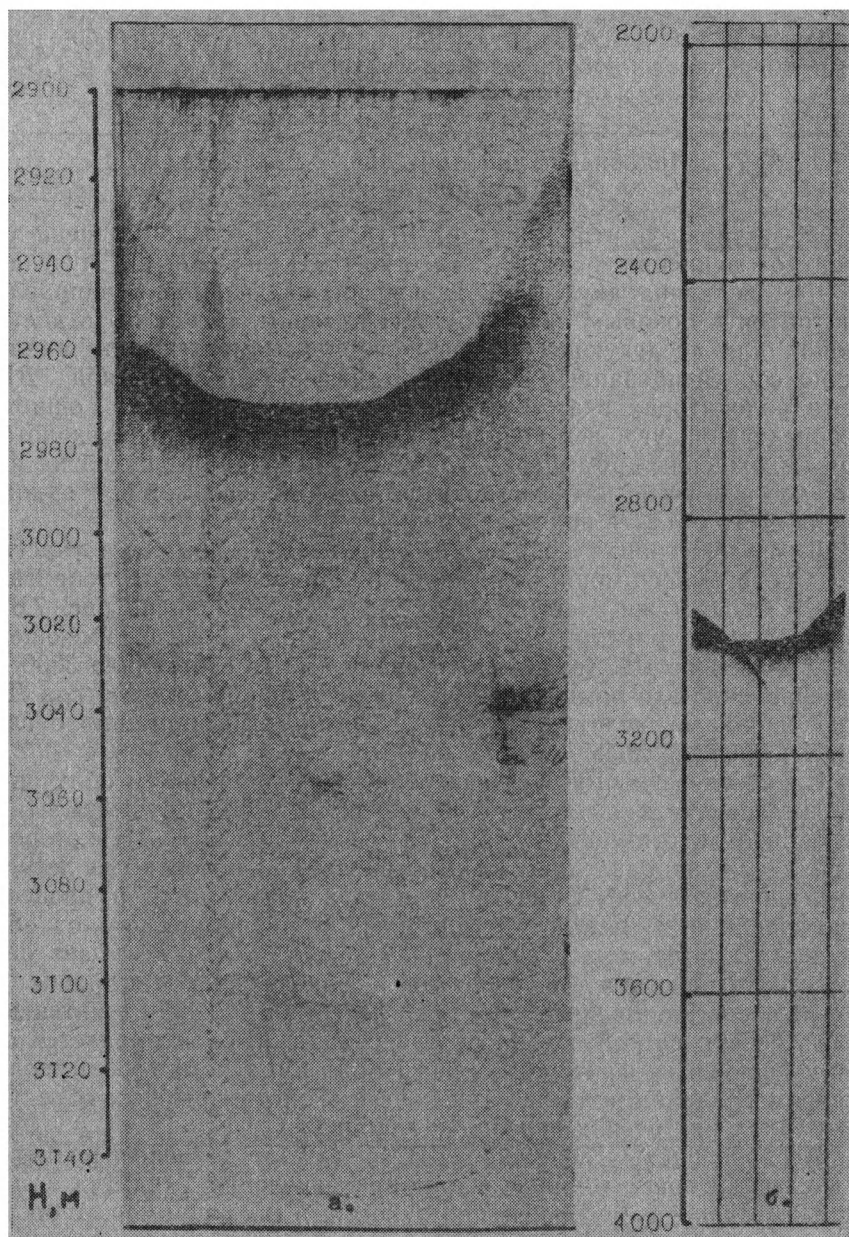


Рис. 7.6. Эхограммы участка дна Средиземного моря, полученные при синхронной записи эхолота Schelfrandlot 1 СО (а) и параметрического гидролокатора ПГЛ-5 (б).

какой-либо стороне прямоугольника). Более низкие уровни боковых лепестков могут быть получены при использовании антенн с излучающей поверхностью в форме ромба, равнобоочной трапеции, двух равнобоочных трапеций, состыкованных большими основаниями, параллелограмма и др. [64]. Такие антенны изготавливаются в виде «мозаики» из отдельных преобразователей прямоугольной или круглой формы. Вопросы их расчета рассмотрены в [25, 64, 78]. Для иллюстрации на рис. 7.7 показано расположение 51 преобразователя в антенне SW 6029 эхолота Atlas Fischfinder 791DS.

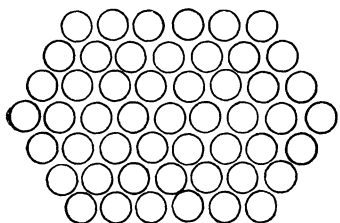


Рис. 7.7. Расположение преобразователей в антенне SW 6029.

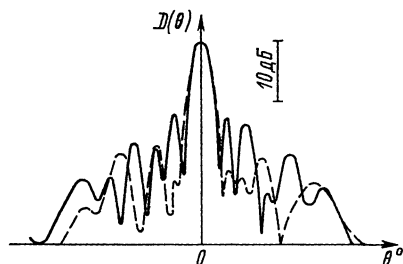


Рис. 7.8. ДН экспериментального образца 12-канальной прямоугольной АС с равномерным (сплошная кривая) и дольф-чебышевским (штриховая кривая) амплитудными распределениями при наличии амплитудных и фазовых ошибок по каналам.

В многоэлементных антеннах РПА для уменьшения уровня боковых лепестков вводятся, так называемые, оптимальные распределения амплитуды возбуждения элементов антенны (чебышевское, дольф-чебышевское и др.), обеспечивающие минимальное расширение главного лепестка ДН при задаваемом уровне боковых лепестков, или наоборот. Необходимые для инженерных расчетов аналитические зависимости, таблицы и графики имеются в литературе [3, 25, 116].

Хотя боковые лепестки в дольф-чебышевских антеннах и имеют малую величину, следует отметить, что из-за равенства уровней всех боковых лепестков доля рассеиваемой ими мощности довольно значительна. Вследствие этого при больших волновых размерах антенны возможно значительное падение величины коэффициента осевой концентрации.

Существуют амплитудные распределения, близкие по критерию минимального расширения главного лепестка ДН к «идеальному» распределению Дольф—Чебышева, но более простые в расчетах и практической реализации [54, 82]. У многих из этих приближенных к оптимальному распределению уровни боковых лепестков в отличие от дольф-чебышевского не постоянны и спадают по законам, близким к закону для ДН с равномерным амплитудным

распределением, что также во многих случаях является преимуществом.

Влияние амплитудных распределений иллюстрируется рис. 7.8, на котором представлены записанные на измерительном самодиске ДН экспериментального образца 12-канальной прямоугольной антенны с равномерным (сплошная кривая) и дольф-чебышевским амплитудным распределением (штриховая кривая). Волновой размер преобразователей в плоскости измерения составлял $0,47\lambda$, расстояние между их центрами $0,5\lambda$, поперечный размер антенны — 6λ . При уровнях боковых лепестков 22 и 5,6 % (соответственно для идеального равномерного и дольф-чебышевского распределения) в реальной конструкции эти величины составляли 27 и 12,5 %. Столь резкое несоответствие вызвано наличием амплитудных и фазовых разбросов в элементах и каналах электронных трактов, которые в данном эксперименте составляли: по амплитуде менее $\pm 30\%$, по фазе менее $\pm 22^\circ$.

Амплитудные ошибки обусловлены разбросами чувствительности или выходом из строя элементов антенны, а также неточностью или дискретностью установки в электронных трактах коэффициентов амплитудного распределения. Фазовые ошибки возникают вследствие технологических неточностей установки элементов антенны, разбросов частотных характеристик элементов антенны и электронных трактов, дискретности фазовых или временных сдвигов при цифровом формировании ДН. Амплитудные и фазовые ошибки (разбросы) могут быть учтены в расчетных соотношениях [26, 119]. Так, например, для плоской прямоугольной антенны с $M \times N$ эквидистантно расположенными элементами среднее значение ДН по интенсивности определяется следующим выражением [119]:

$$\overline{|D(\varphi, \theta)|^2} = P_s^2 e^{-\bar{\delta}^2} |D_0(\varphi, \theta)|^2 + [P_s(1 + \Delta^2) - P_s^2 e^{-\bar{\delta}^2}] \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N W_{mn}^2, \quad (7.9)$$

где P_s — вероятность безотказной работы элемента антенны; $\bar{\delta}^2$ и Δ^2 — дисперсии фазовой и амплитудной ошибок соответственно; $D_0(\varphi, \theta)$ — ДН по давлению «идеальной» антенны; W_{mn} — амплитудный коэффициент mn -го элемента.

Вследствие того, что амплитудно-фазовые ошибки являются случайными величинами, а отказ элемента антенны — случайным событием, расчет антенных трактов с заданным уровнем бокового поля становится статистической задачей. Это означает, что для антенны с определенными геометрическими размерами, количеством элементов и амплитудно-фазовыми разбросами существует и определенная вероятность того, что величина любого бокового лепестка не превысит задаваемый при проектировании уровень [26]. В процессе проектирования может возникнуть необходимость решения

обратной задачи — по заданной вероятности P_d определить предельный уровень бокового поля R_n при существующих параметрах антенны и амплитудно-фазовых ошибках [44]. В общем случае нахождение предельного уровня R_n является довольно сложной задачей и может решаться путем моделирования на ЭВМ (для одной и той же конструкции антенны) набора ДН при различных совокупностях параметров антенных трактов, выбираемых для каждой ДН случайным образом, и последующей статистической обработки результатов моделирования [26, 119].

§ 7.4. Коэффициент осевой концентрации антенн РПА

Для оценки эффективности концентрации энергии в направлении главного максимума ДН вводится понятие коэффициента осевой концентрации γ_n в виде отношения интенсивности I , создаваемой антенной в дальнем поле в направлении оси главного максимума, к средней интенсивности I_0 , которую создавал бы в той же точке ненаправленный точечный источник, излучающий ту же акустическую мощность

$$\gamma_n = I/I_0. \quad (7.10)$$

В некоторых случаях используется понятие коэффициента концентрации в заданном направлении φ . Значение этого коэффициента определяется из следующего выражения:

$$\gamma_n(\varphi) = \gamma_n R^2(\varphi). \quad (7.11)$$

При решении уравнений гидролокации в логарифмической форме (см. гл. 4) используется понятие коэффициента направленности DI , равного

$$DI = 10 \lg(I/I_0) = 10 \lg \gamma_n. \quad (7.12)$$

Коэффициент осевой концентрации может быть выражен через характеристику направленности или через активное сопротивление излучения антенны [64, 79]. Соотношения, получаемые в обоих случаях, достаточно сложны для решения и требуют при нахождении числовых значений γ_n использования ЭВМ. Для плоских излучателей в экране с линейными размерами, превышающими $(1,5-2)\lambda$ [64], с достаточной точностью справедливо следующее простое соотношение:

$$\gamma_n = 4\pi S/\lambda^2, \quad (7.13)$$

где S — площадь излучающей поверхности поршня.

Для непрерывных цилиндрических антенн, имеющих радиус $R \gg \lambda$ и высоту $H \gg \lambda$ и работающих в режиме ненаправленного излучения в плоскости, перпендикулярной оси цилиндра, коэффициент осевой концентрации можно определить из следующего выражения [64, 79]:

$$\gamma_n = 2H/\lambda. \quad (7.14)$$

Выражение для $\gamma_{\text{и}}$ дискретных плоских антенн имеет сложную зависимость от расстояния d между элементами антенны, размеров самих элементов, их количества и взаимного расположения. Однако в антеннах РПА при числе элементов более 25 и $d/\lambda < (0,6-0,8)$, величина $\gamma_{\text{и}}$ с достаточной точностью [79] определяется выражением (7.13). При этом за S принимают полную площадь излучающей поверхности антенны.

Для дискретных цилиндрических антенн кроме факторов, указанных для плоских антенн, на величину $\gamma_{\text{и}}$ в значительной мере влияет величина рабочего сектора антенны. Математические зависимости, учитывающие всю совокупность факторов и позволяющие найти оптимальный вариант построения цилиндрической антенны, приведены в [64, 81].

Для компенсации ДН дискретной плоской антенны с равномерным амплитудным распределением на угол $\varphi_{\text{к}}$, не слишком близкий по величине к 90° , значение $\gamma_{\text{и}}(\varphi_{\text{к}})$ определяется [54, 81] из выражения

$$\gamma_{\text{и}}(\varphi_{\text{к}}) = (4\pi s \cos \varphi_{\text{к}})/\lambda^2. \quad (7.15)$$

Введение неравномерного амплитудного распределения по поверхности антенны уменьшает величину $\gamma_{\text{и}}$ [64, 81] вследствие расширения основного лепестка ДН. Отказы элементов антенны или каналов электронных трактов, а также наличие амплитудных и фазовых ошибок возбуждения (см. § 7.3) дополнительно снижают реальную величину $\gamma_{\text{реал}}$ [26, 81, 119]. Степень этого снижения по сравнению с теоретическим значением $\gamma_{\text{и}}$ можно оценить по выражению [119]

$$\gamma_{\text{реал}}/\gamma_{\text{и}} \approx P_{\text{э}}/(1 + \overline{\Delta}^2 + \overline{\delta}^2). \quad (7.16)$$

§ 7.5. Излучаемая мощность и звуковое давление

Основными параметрами, определяющими энергетическую эффективность работы тракта излучения РПА, являются излучаемая акустическая мощность $W_{\text{а}}$ и звуковое давление p , создаваемое на оси ДН антенны. При проектировании и эксплуатации РПА широко используется величина приведенного звукового давления $p_{\text{эф}}(1 \text{ м})$, развиваемого антенной на расстоянии 1 м от ее поверхности. Следует помнить, что величина $p_{\text{эф}}(1 \text{ м})$ является условной, так как граница дальнего поля антенны обычно находится дальше расстояния $r=1 \text{ м}$, а распределение звукового давления в ближнем поле (см. рис. 7.1) имеет сложную зависимость. Связь между величинами $W_{\text{а}}$, p , $\gamma_{\text{и}}$ и $p_{\text{эф}}(1 \text{ м})$ и параметрами среды определяется выражениями (5.10) и (5.12).

В процессе проектирования РПА стараются получить от выбранного типоразмера антенны максимально возможную излучаемую акустическую мощность. Последняя определяется величиной предельно допустимой удельной акустической мощности, максимальная величина которой ограничивается значениями допустимых

механических напряжений в активном материале [81] преобразователей антенны, кавитационной прочностью воды и иногда порогом образования разрыва [60]. Возникающие в преобразователе механические напряжения зависят от его конструкции, материала активных элементов, величины снимаемой с его излучающей поверхности акустической мощности и не должны превышать предела прочности материала активного элемента. Соответствующие аналитические зависимости и параметры активных материалов, приведены в справочнике [81]. Кавитационная прочность жидкости количественно характеризуется интенсивностью звука $I_{\text{кав}}$, при которой возникает кавитация — это так называемый порог кавитации. Последний зависит от гидростатического давления, частоты акустических колебаний, длительности излучаемых импульсов, вязкости и степени насыщенности среды воздушными пузырьками. При проектировании буксируемых антенн РПА и антенн систем контроля орудий лова приходится учитывать зависимость порога кавитации $I_{\text{кав}}$ от заглубления h антенны [64, 81]

$$I_{\text{кав}} = 3 \cdot 10^3 (1 + 0,1h)^2, \text{ Вт/м}^2. \quad (7.17)$$

В расчетах антенн для импульсного локационного режима РПА можно использовать более высокие уровни удельной мощности [64, 81], так как порог кавитации $I_{\text{кав}}$ в этом случае выше (см. табл. 5). В диапазоне частот от 15 до 50 кГц с ростом частоты порог кавитации возрастает приблизительно на 30 % [81].

Таблица 5. Значения порога кавитации антенн РПА в зависимости от длительности излучаемого импульса

Длительность зондирующих импульсов, мс	2	5	10	20	>100
$I_{\text{кав}}, \text{ Вт/м}^2$	$15 \cdot 10^4$ — $18 \cdot 10^4$	$(10-12) \cdot 10^4$	$(7-8) \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^4$	$0,3 \cdot 10^4$

Полученное при предварительных расчетах для конкретной площади S антенны с равномерным распределением значение W_a должно удовлетворять следующему неравенству:

$$W_a \leq I_{\text{кав}} S. \quad (7.18)$$

Для многоэлементных антенн с неравномерным амплитудным распределением необходимо проверять соблюдение неравенства (7.18) для каждого элемента антенны, так как вполне возможно, что полная мощность антенны удовлетворяет неравенству при одновременном невыполнении его для части элементов антенны.

Величина электрической мощности $W_э$, необходимой для получения заданной W_a , определяется выражением

$$W_э = W_a / \eta_{эа}, \quad (7.19)$$

где $\eta_{\text{эа}}$ — электроакустический КПД антенны. Для преобразователей и антенн из пьезокерамики мощность $W_{\text{э}}$ можно также определить из выражения

$$W_{\text{э}} = U^2/R_W, \quad (7.20)$$

где U — эффективное напряжение возбуждения антенны; R_W — полное активное сопротивление антенны. Сопротивление R_W является важным параметром, необходимым для согласования антенны с электронными трактами РПА, и может быть представлено для пьезокерамических антенн в виде параллельно соединенных сопротивлений электрических потерь $R_{\text{э.п.}}$, механических потерь $R_{\text{м.п.}}$ и сопротивления излучения $R_{\text{с}}$ [64].

§ 7.6. Длительность и частота следования излучаемых импульсов

При выборе длительности излучаемых импульсов τ разработчик РПА сталкивается с противоречивыми требованиями. С одной стороны, для достижения минимально возможной величины порога обнаружения целесообразно использовать зондирующие импульсы с максимально возможной длительностью. Кроме того, импульсы большой длительности ($\tau > 10$ мс) используются для поиска промысловых объектов с индикацией на слух, что позволяет оператору слышать характерные изменения частоты и окраски звука, возникающие вследствие наличия эффекта Доплера и различий в структуре лоцируемых объектов поиска, и правильно интерпретировать и определять параметры последних. Но максимальная длительность импульса ограничивается габаритами накопительных устройств генераторного тракта, емкость которых пропорциональна длительности импульса (см. § 11.1). Кроме того, в условиях воздействия реверберационной помехи при достижении определенного значения τ дальнейшее его увеличение нецелесообразно из-за маскирования полезных эхосигналов. С другой стороны, для получения минимальной мертвой зоны $l_{\text{м.з}}$ и наилучшей разрешающей способности $l_{\text{р}}$ по дистанции (глубине) необходимо использовать возможно более короткие импульсы излучения, так как эти параметры, например, для однолучевой РПА пропорциональны длительности импульса излучения

$$l_{\text{м.з}} = l_{\text{р}} = c\tau/2. \quad (7.21)$$

Реальные величины разрешающей способности и мертвой зоны больше теоретических иногда в 1,5—2,5 раза (особенно при $\tau \leq 1$ мс) [47].

Для широкосекторной РПА с внутримпульсным сканированием величина $l_{\text{р}}$ определяется по (7.21), но мертвая зона может значительно превышать аналогичный параметр однолучевой аппаратуры. В этом случае [47]

$$l_{\text{м.з}} = (n\tau + t_{\text{в}})c/2, \quad (7.22)$$

где n — число направлений зондирования за цикл излучения; t_b — время восстановления чувствительности приемно-усилительного тракта.

Иногда для уменьшения мертвой зоны (обычно на самом коротком диапазоне, как например, в широкосекторных гидролокаторах «Таймень», Atlas Fishing Sonar 950 фирмы «Krupp» и SM600 фирмы «Simrad») используется компромиссное решение, при котором излучение зондирующего импульса осуществляется одновременно в широком секторе, а прием эхосигналов производится путем сканирования этого сектора узкой ДН. В гидролокаторе СН-12 фирмы «Furuno» такое решение используется на всех диапазонах при величине сектора одновременного обзора 30° .

Минимально достижимая длительность импульса излучения имеет определенные ограничения в связи с тем, что гидроакустическая антенна является колебательной системой с резонансными свойствами. Максимальная амплитуда колебаний устанавливается и спадает через определенное время переходного процесса. Типичная осциллограмма колебательного процесса при воздействии на колебательную систему прямоугольного радиоимпульса приведена на рис. 7.9. Теоретически нарастание и спад амплитуды сигнала происходит почти по экспоненциальным законам и колебательная система приближается к установившемуся состоянию или состоянию покоя асимптотически. На практике установившимся состоянием считают момент, когда амплитуда колебаний достигает 0,95 максимального значения, что возможно за время, приблизительно равное Q периодам (Q — добротность колебательной системы) частоты возбуждения [11, 78].

Таким образом, для обеспечения эффективного излучения акустической энергии к расчетной величине длительности излучения τ необходимо прибавлять время, соответствующее Q периодам рабочей частоты, а при определении мертвой зоны эта прибавка удваивается.

Для удовлетворения рассмотренных противоречивых требований практически в любую РПА (см. табл. 2) вводится плавная или дискретная регулировка длительности излучаемых импульсов. Довольно часто в целях упрощения пользования аппаратурой дискретное переключение длительности осуществляется автоматически при изменении диапазона индикации или регистрации, при

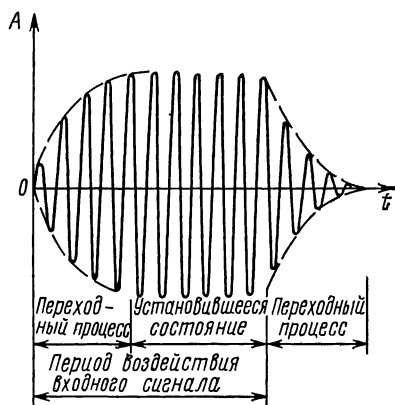


Рис. 7.9. Осциллограмма колебательного процесса при воздействии прямоугольным радиоимпульсом на колебательную систему ($Q=4$).

этом длительность импульса обычно изменяется пропорционально устанавливаемому диапазону.

Существенное значение имеет частота следования излучаемых импульсов. Она определяет скорость получения информации, а, следовательно, и количество эхоконтактов с объектом поиска при движении судна. Как было показано ранее, увеличение количества эхоконтактов с объектом поиска увеличивает кумулятивную вероятность правильного обнаружения. Кроме того, в РПА с устройствами межциклового накопления и обработки информации при этом улучшается отношение сигнал/помеха. Поэтому, естественно, что разработчик РПА обычно стремится получить максимально возможную частоту следования излучаемых импульсов.

§ 7.7. Компенсация влияния эффекта Доплера

Центральная частота f_0 эхосигналов, принимаемых антенной гидролокатора при локации подводных объектов с борта движущегося судна, вследствие влияния эффекта Доплера отличается от значения излучаемой несущей частоты f и определяется следующим выражением [47, 87]:

$$f_0 = f [1 + 2 (v_k \cos \beta + v_c \cos \alpha) / c], \quad (7.23)$$

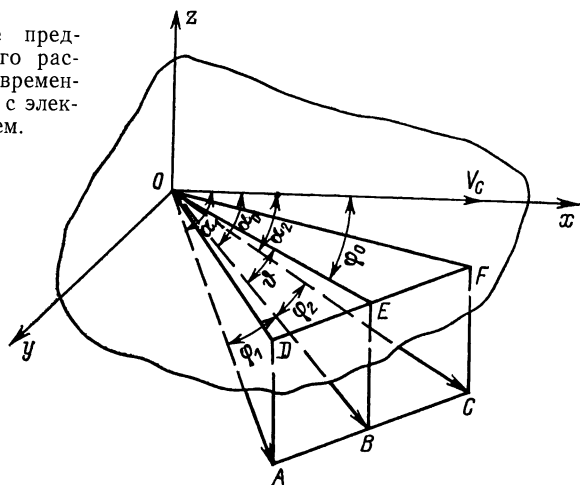
где v_c — скорость судна; v_k — скорость объекта локации (рыбного косяка); α и β — соответственно углы между векторами скорости судна или объекта локации и направлением зондирования. В зависимости от направления и скорости движения судна и объекта локации частота принимаемых эхосигналов может быть как выше (при сближении), так и ниже (при удалении) несущей частоты излучаемых сигналов.

Наличие эффекта Доплера вынуждает проектировщиков РПА использовать в приемно-усилительных трактах гидролокаторов частотные фильтры с полосой пропускания, значительно превышающей оптимальную величину. В результате этого увеличивается влияние принимаемых шумов и соответственно уменьшается отношение сигнал/помеха, из-за чего падает максимальная дальность обнаружения, а на более близких дистанциях ухудшается качество регистрации и индикации принимаемых сигналов вследствие увеличения шумового фона.

Так как обычно скорость судна при поиске превышает скорость перемещения рыбных косяков [111], компенсация влияния эффекта Доплера, возникающего только из-за собственного движения судна, и соответствующее сужение полосы пропускания приемного тракта могут дать значительный выигрыш в отношении сигнал/помеха. Возможны два способа компенсации — перестройка центральной частоты приемного тракта и изменение несущей частоты заполнения излучаемого импульса. Первый способ требует больших аппаратных затрат особенно в многоканальных приемниках сканирующих гидролокаторов. В то же время при втором способе как в одноканальных, так и в многоканальных генераторных

устройствах достаточно осуществлять перестройку частоты только одного узла — задающего генератора. При втором способе возникает новое положительное качество аппаратуры — центральные частоты эхосигналов от неподвижных объектов и центральная частота спектра реверберации остаются всегда постоянными, независимо от скорости собственного движения судна. Кроме того, центральная частота эхосигналов от неподвижных объектов не зависит в этом случае и от направления зондирования, а центральная частота спектра реверберации или остается постоянной, или изменяется незначительно. В результате упрощается оценка ско-

Рис. 7.10. Геометрическое представление пространственного расположения сектора одновременного обзора гидролокатора с электронным сканированием.



рости и направления движения объекта как на слух оператором, так и с помощью аппаратных средств.

Для компенсации влияния эффекта Доплера, возникающего вследствие собственного движения судна, обычно используется второй способ [118, 58]. В этом случае для получения постоянной центральной частоты эхосигналов, принимаемых от неподвижных объектов, необходимо обеспечивать излучение на несущей частоте

$$f(v_c, \alpha) = f_s / (1 + 2v_c \cos \alpha / c) \approx f_s (1 - 2v_c \cos \alpha / c). \quad (7.24)$$

Значения косинуса угла между вектором скорости судна и направлением зондирования можно находить, используя сигналы датчиков углов наклона и разворота акустической антенны, которые имеются в составе гидролокатора.

В гидролокаторах одновременного секторного обзора возникает необходимость в использовании значений углов, образуемых осями ДН с плоскостью, в которой осуществляется наклон антенны. Для типичного в РПА широкосекторного гидролокатора с механическим разворотом и наклоном акустической системы на рис. 7.10 изображено расположение условного сектора одновременного обзора в виде треугольника АОС. Векторы ОА и ОС представляют собой

оси крайних ДН сектора обзора, а вектор OB — ось DH , лежащей в плоскости наклона антенны. Для плоских антенн вектор OB обычно совпадает с нормалью к излучающей поверхности антенны. Вектор V_c соответствует вектору скорости судна. Треугольник DOF является проекцией треугольника AOC на плоскость горизонта. В итоге угол разворота антенны в горизонтальной плоскости соответствует углу φ_0 , угол наклона антенны в вертикальной плоскости — углу θ , а углы φ_1 и φ_2 представляют собой углы, образуемые крайними лучами сектора обзора с плоскостью наклона антенны. Из рис. 7.10 получаются соотношения

$$\cos \alpha_1 = \cos \varphi_0 \cos \varphi_1 \cos \theta - \sin \varphi_0 \sin \varphi_1; \quad (7.25)$$

$$\cos \alpha_2 = \cos \varphi_0 \cos \varphi_2 \cos \theta + \sin \varphi_0 \sin \varphi_2. \quad (7.26)$$

В частном случае для DH , ось которой соответствует вектору OB , а также для однолучевых гидролокаторов выражения (7.25) и (7.26) упрощаются и преобразуются к виду

$$\cos \alpha_0 = \cos \varphi_0 \cos \theta. \quad (7.27)$$

Формула (7.27) пригодна и для сканирующих гидролокаторов с неподвижной цилиндрической антенной и электронным наклоном ДН. В этом случае угол θ соответствует углу наклона конкретной ДН, а угол φ_0 представляет собой угол между вертикальной плоскостью, проходящей через вектор скорости судна V_c , и вертикальной плоскостью, проходящей через ось этой же ДН.

§ 7.8. Основные характеристики излучения параметрических антенн

Основными характеристиками ПА, необходимыми для конструирования РПА, являются осевое распределение звукового давления ВРЧ, ДН и амплитудно-частотная характеристика (АЧХ). Аналитические выражения для их расчета получены В. К. Новиковым [60] из решения уравнения Хохлова—Заболотской—Кузнецова, позволяющего учесть дифракцию и затухание взаимодействующих волн накачки. Полная теория ПА приведена в книгах [60, 61].

Звуковое давление p волны разностной частоты F в любой точке (r, z) пространства в цилиндрической системе координат определяется следующим выражением:

$$p(r, z) = \frac{p_{01} p_{02} \varepsilon \Omega^2 a^2}{8c^4 \rho} e^{-z/L_3} \int_0^{z_3} \frac{\exp \left[-y - \frac{r_w^2 (1 + iBy)}{d + i(y - z_3) + z_3 y B} \right]}{d + i(y - z_3) + y z_3 B} dy, \quad (7.28)$$

где p_{01} , p_{02} — амплитуды звукового давления волн накачки с частотами f_1 и f_2 ; $\varepsilon = (\gamma + 1)/2$ — нелинейный параметр, коэффициент γ для жидкостей принимает значения от 4 до 11 (для воды $\gamma \approx$

$\approx 7,1$) [28, 60]; $\Omega = \omega_1 - \omega_2 = 2\pi(f_1 - f_2) = 2\pi F$; $L_d = 2\pi F a^2 / 4c$ — длина области дифракции ВРЧ; $K = \Omega / c$; $r_w = 2r^2 L_d / a l_3$; $l_3 = 1/\beta$ — длина области затухания волн накачки; $d = L_d / l_3$; $B = L_d l_3 / l_{d1} l_{d2}$; $z_3 = z / l_3$. Видно, что звуковое давление ВРЧ в любой точке пространства зависит от координат точки, звукового давления волн накачки, апертурных факторов и свойств среды. Параметры B и d являются основными для расчета различных режимов ПА. На расстояниях $z < l_d = ka^2/2$ (где $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число для накачки) основное влияние на p оказывает параметр d , а при $z > l_d$ определяющим становится параметр B . На оси ($z=0$) подынтегральное выражение значительно упрощается и решение (7.28) может быть выражено через табулированные интегральные показательные функции типа

$$Ei(x) = \int_{-\infty}^x \frac{e^y}{y} dy;$$

$$p(0, z) = \frac{p_{01} p_{02} \varepsilon \Omega^2 a^2}{8c^4 \rho (i + Bz_3)} e^{\frac{d - iz_3}{i + Bz_3}} \left[Ei\left(\frac{Bz_3 + d}{i + Bz_3}\right) - Ei\left(\frac{d - iz_3}{i + Bz_3}\right) \right]. \quad (7.29)$$

Выражение (7.29) позволяет проанализировать распределение амплитуды и фазы ВРЧ на оси ПА. Зафиксировав расстояние z (обычно в дальней зоне), можно рассчитать амплитудно-частотную и динамическую характеристику ПА. Отношение модуля выражения (7.28) к модулю выражения (7.29) дает формулу для расчета ДН.

Расчет характеристик ПА производится с помощью ЭВМ. Для некоторых инженерных расчетов можно использовать специальную счетную линейку или номограммы [60, 93], созданные на базе расчетов на ЭВМ по выражениям (7.28), (7.29). Часть номограмм для расчета основных характеристик ПА приведена на рис. 7.11 и 7.12.

На рис. 7.13 и 7.14 приведены осевые распределения амплитуды звукового давления $p(z)$ соответственно для параметрического рыбопоискового прибора «Пескарь» и исследовательского параметрического гидролокатора ПГЛ-5. Технические характеристики параметрических отечественных гидроакустических приборов приведены в табл. 6. Сплошные кривые соответствуют результатам расчета по выражению (7.29). Экспериментальные данные отмечены точками. Расчет проведен для амплитуды звукового давления $p = 800$ Па, измеренной при испытаниях прибора на расстоянии $z = 4$ м.

Анализ расчетных и экспериментальных данных (см. рис. 7.13 и 7.14) показывает, что для ПА характерен не монотонный рост амплитуды ВРЧ, а с выраженным, но достаточно пологим максимумом на расстоянии $z_{\max} \approx \sqrt{l_{d1} l_{d2}}$, что связано с дифракцией высокочастотных волн накачки. После максимума происходит

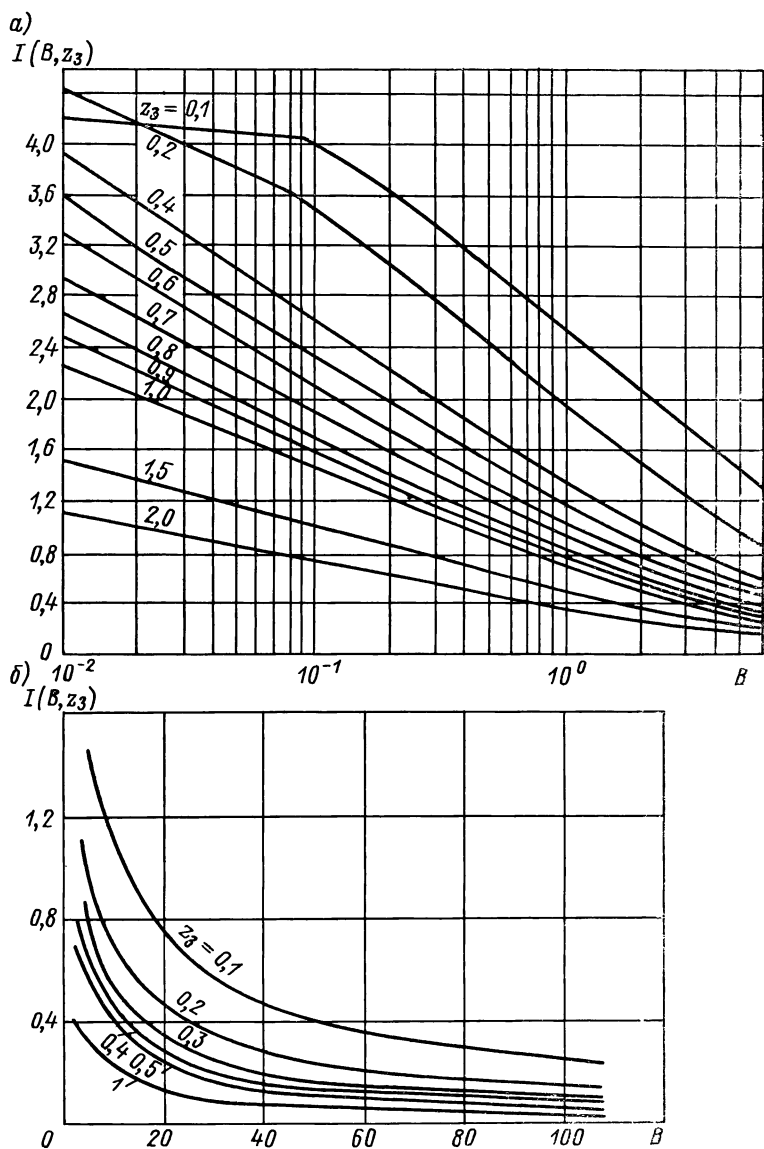
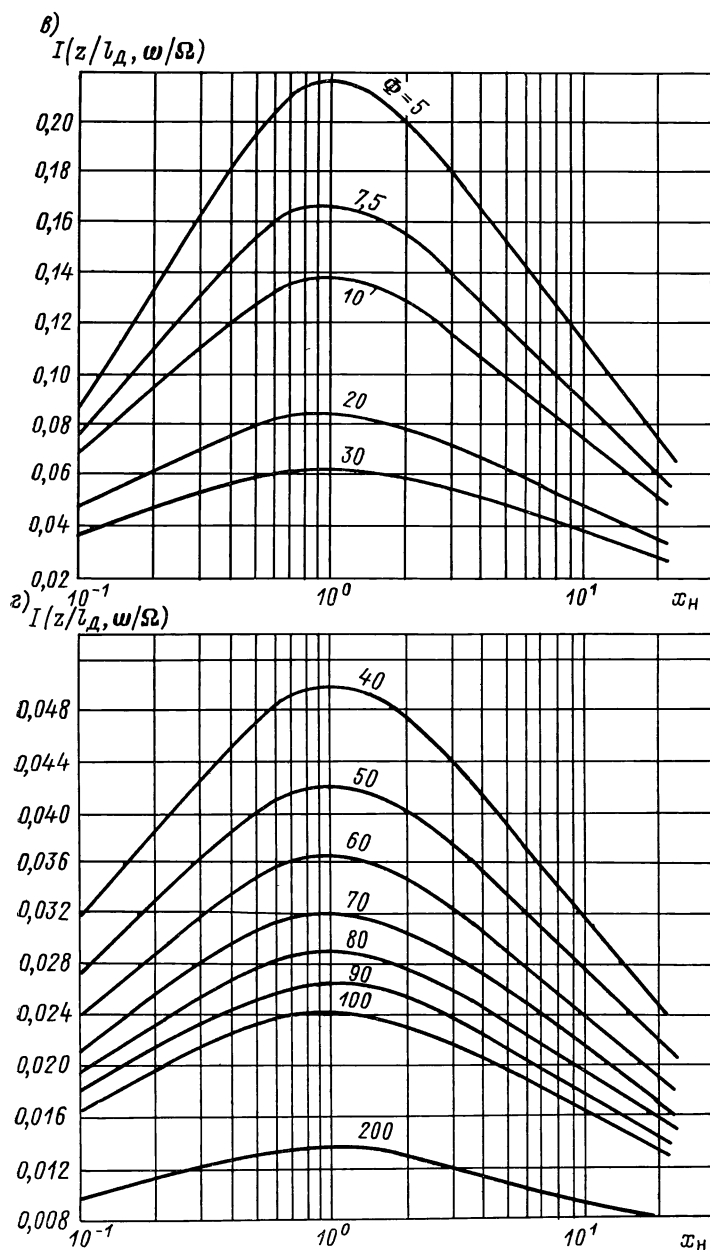


Рис. 7.11. Номограммы для расчета амплитуды звукового давления на при $z \gg l_d$ (а, б) и параметров z/l_d



оси ПА при различных значениях параметров B и z_3 для дальней зоны и ω/Ω для ближней зоны (в, з).

спадание уровня p звукового давления ВРЧ. И достаточно быстро, на расстоянии $z \approx (5-8)l_d$ волна начинает подчиняться сферическому закону распространения. Именно с этих расстояний можно рассчитывать для ПА используемый на практике уровень звукового давления, приведенного к 1 м. До указанных расстояний происходит интенсивная перекачка энергии волн накачки в энергию ВРЧ. Поэтому показанный на рис. 7.14 (кривая 2) уровень звукового давления ВРЧ, приведенный к 1 м, растет до расстояния $(5-8)l_d$.

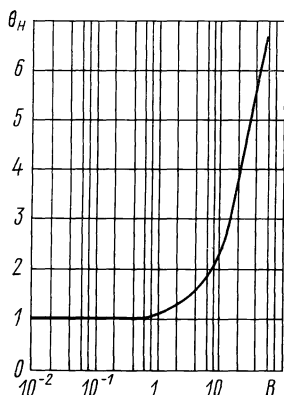


Рис. 7.12. Номограмма для расчета ширины ДН по уровню 0,7 в дальней зоне ПА при $z > l_d > \omega/\Omega$.

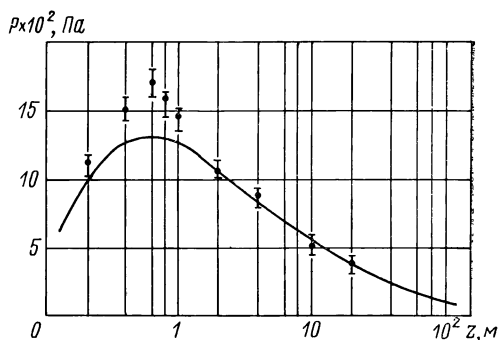


Рис. 7.13. Распределение амплитуды звукового давления на оси антенны рыбопоискового прибора «Пескарь».

$f_1 = 300$ кГц; $f_2 = 250$ кГц; $F = 50$ кГц, для обнаружения одиночной рыбы с $R_0 = 0,1$ м на дистанции 100 м с коэффициентом надежности $k = 2$ при уровне приведенных помех $p_{п.о} = 0,1$ Па, величина $W_a \approx 70$ Вт по каждой из частот накачки.

В вопросах формирования излучения ПА, естественно, играют существенную роль фазовые соотношения в волнах накачки и ВРЧ. В нелинейном случае эти фазы связаны. Аналитический расчет фазового распределения ВРЧ, считая опорной фазу излучения на оси ПА вблизи источника накачки, можно выполнить с помощью выражения (7.29), составив отношение мнимой Im к действительной Re части выражения $p(0, z)$:

$$\varphi(0, z) = \arctg \{ \text{Im} [p(0, z)] / \text{Re} [p(0, z)] \}. \quad (7.30)$$

Расчеты и эксперименты [28, 60] показывают, что φ по мере удаления от преобразователя накачки растет вместе с амплитудой, стремясь к постоянному значению $\pi/2$. Начиная с области стабилизации ($z \approx l_d$), фаза ВРЧ практически не изменяется. Поперечное распределение фазы и амплитуды ВРЧ в различных сечениях ПА остается плавным, без резких провалов, характерных для ближнего поля традиционного преобразователя конечной

Т а б л и ц а 6. Технические характеристики параметрических гидроакустических приборов для активной локации

Тип прибора	Рабочая частота, кГц	Звуковое давление, приведенное к 1 м, Па	Ширина диаграммы направленности 0,7 град	Длительность импульса, мс	Метод формирования сигналов	Преобразователь накачки				Назначение
						Число элементов	резонансная частота, кГц	размер, мм	конструкция	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
ПГЛ-300	1—25	1500 на $f = 20$ кГц	4	0,1—20	Биеение	1	300	Ø 100	Круглый сплошной	Геолокация, эхолотирование
ПГЛ-2	136	15 000	3,5	0,05—3,0	Двухканальный	28	400 и 536	75 × 75	Квадратный мозаичный	Гидролокация, рыбопоиск
ПГЛ-2А	50	2000	3,5	0,1—3,0	То же	28	406 и 456	75 × 75	То же	Гидролокация, рыбопоиск
ПГЛ-3	5—20	2000 на $f = 20$ кГц	4	0,5—10	Биеение	1	276	Ø 100	Круглый сплошной	Геолокация, эхолотирование
ПГЛ-4 «Пескарь»	50	4000	6	0,3—1,0	Двухканальный	1	250 и 300	Ø 65	Круглый маслянаполненный	Гидролокация, рыбопоиск
ПГЛ-5	5—50	4000 на $f = 20$ кГц	3	0,75—20	Биеение	400	185	Ø 160	Круглый мозаичный	Гидролокация, океанологические исследования
Режим параметрического излучения в «Сарган-ЭМ»	20		2,5		Самодетектирование	19	136	Ø 350	Круглый	Рыболокация, эхолотирование, навигация
РаСО-30	3,5—15	200—210 дБ	2,5	—	—	271	40—60	Ø 620	То же	Калибрующий эхолотатор

апертуры. До расстояний порядка $z \approx l_d$ фронт ВРЧ квазиплоский, затем начинается его дифракционная расходимость.

Отношение модуля (7.28) к модулю выражения (7.29) дает соотношение для расчета нормированного поперечного распределения амплитуды ВРЧ, а в дальнейшем поле — ДН ПА. Это соотношение позволяет анализировать ДН во всем диапазоне изменения основных характеристик. Однако оно поддается расчету только на ЭВМ.

На рис. 7.12 приведена расчетная номограмма изменения ширины ДН $2\theta_H = 2\theta_{0,7}/2\theta_{0,7}^W$ в функции от параметра B . Величина $\theta_{0,7}^W = 2(kl_3)^{-1/2}$ получается из (7.28) при $B \ll 1$. Этот случай управ-

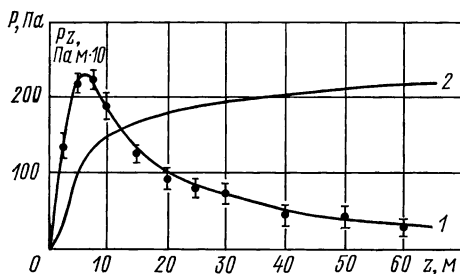


Рис. 7.14. Распределение амплитуды ВРЧ на оси ПА (кривая 1) и приведенный к 1 м уровень p_z (кривая 2) для параметрического гидролокатора ПГЛ-5 на частоте $F = 10$ кГц.

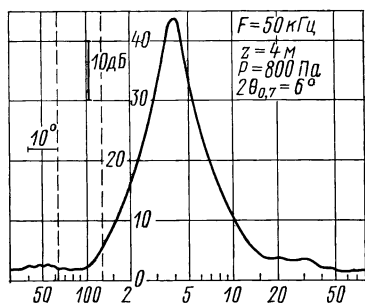


Рис. 7.15. ДН ПА рыбопоискового прибора «Пескарь».

ляемой затуханием ПА называется вестервельтовской антенной [60]. Из последнего соотношения следует, что ширина ДН зависит от $(\Lambda/l_3)^{1/2}$, где Λ — длина волны разностной частоты.

В некоторых случаях ширину ДН ПА можно оценить по произведению характеристик направленности излучателей накачки и, как правило, она не превышает ширины ДН первичных преобразователей накачки.

Для иллюстрации направленных свойств ПА на рис. 7.15 и 7.16, а приведены записанные на самописец ДН соответственно параметрических приборов «Пескарь» и ПГЛ-5. Видно, что боковые лепестки у ПА практически отсутствуют, уровень бокового излучения составляет для указанных приборов соответственно величину минус 40 и минус 50 дБ. Для сравнения на рис. 7.16, б показана ДН преобразователя накачки на частоте 165 кГц.

Узкая безлепестковая ДН в параметрическом режиме излучения рыбопоискового прибора «Пескарь» впервые позволила с помощью РПА производить поиск одиночных рыб и рыбных скоплений на мелководье. Для иллюстрации на рис. 7.17 приведена эхограмма, полученная с помощью прибора «Пескарь» при траверсном

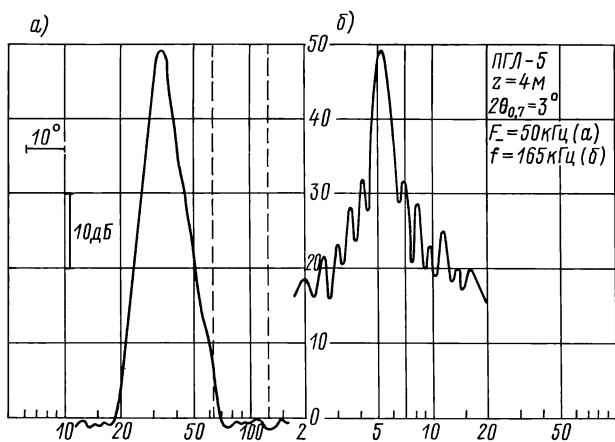


Рис. 7.16. ДН ПА гидролокатора ПГЛ-5 на разностной частоте $F=50$ кГц (а) и преобразователя накачки с $f=165$ кГц (б).

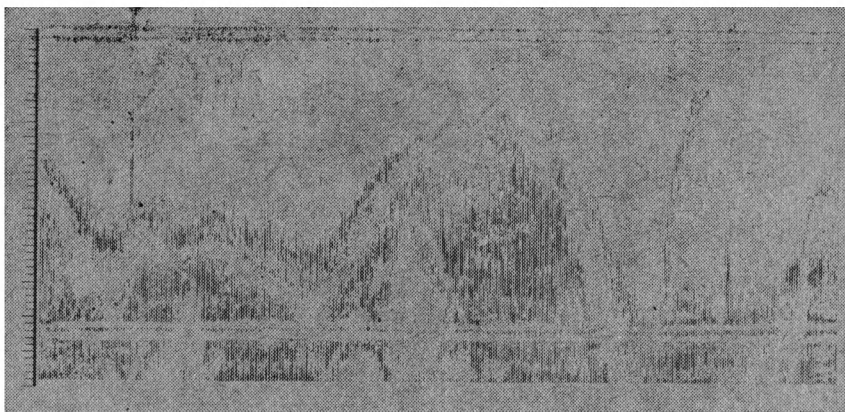


Рис. 7.17. Эхограмма записи параметрическим рыболопным прибором «Пескарь» частичковых рыб на мелководье в стороне от судна (видна линия берега).

обзоре, когда ось ПА направлена горизонтально, а рыбопоисковое судно движется вдоль берега в пойме реки Дон. На эхотраграмме зарегистрирована линия берега и четко видны отражения от одиночных частичковых рыб на различных расстояниях от судна вплоть до отдели (практически нулевая глубина).

В широкополосных параметрических приборах (гидролокаторах ПГЛ-300, ПГЛ-3, ПГЛ-5, НГА-1, эхолоте «Сарган-ЭМ» и измерительных излучателях типа НАИ) реализуется ценное качество ПА в виде постоянства ширины ДН в широкой полосе частот. Для иллюстрации на рис. 7.18 приведена серия характерных

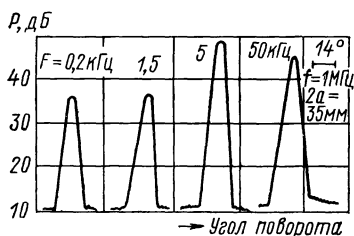


Рис. 7.18. Типовые записи на самописец ДН ПА измерительного излучателя на различных разностных частотах.

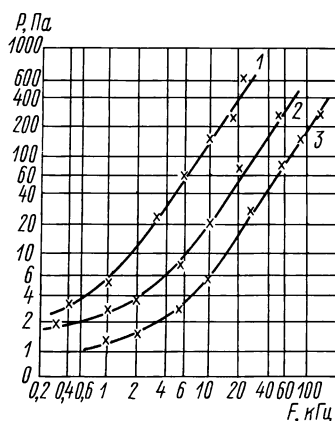


Рис. 7.19. Амплитудно-частотные характеристики ПА с различными частотами накачки (сплошные кривые — теоретические, крестики — эксперимент).

1 — $f=136$ кГц, $z=100$ м; 2 — $f=500$ кГц, $z=15$ м; 3 — $f=1014$ кГц, $z=5$ м.

ДН широкополосного измерительного излучателя ($2a=3,5$ см, $f=1$ МГц), ширина которых практически не меняется для различных разностных частот. Следует отметить, что при этом ярко проявляется свойство малогабаритности первичных преобразователей ПА. Для получения столь высокой направленности излучения на низких частотах традиционной линейной антенной потребовалась бы апертура $2a$ в несколько десятков метров.

В случае необходимости с помощью ПА можно формировать ДН [60] сложной формы: ножевидные для гидролокаторов бокового обзора, типа трапеции, треугольника и т. п. Для управления шириной и направлением главного максимума ДН ПА можно использовать практически все традиционные методы. Кроме того, добавляется возможность управления, использующая изменение конфигурации области взаимодействия (с помощью акустических фильтров, диафрагм и др.).

Для видовой классификации рыбы и использования оптимальных по частоте режимов РПА логично использовать свойство широкополосности ПА. В вопросе широкополосности ПА следует различать два существенно отличающихся режима работы: обычный режим взаимодействия двух или нескольких частот волн накачки и режим самодетектирования.

В обычном режиме ПА, как видно из выражения (7.20), амплитуды ВРЧ на оси имеют сложную частотную зависимость. Можно показать из (7.28) [60], что в предельных случаях при $B \ll 1$ амплитуда $p \sim F^2$, при $B \gg 1$ p не зависит от F . При промежуточных значениях B и d в соответствующих реальных условиях РПА, $p \sim F^n$, где $n \approx 0,3-1,8$. Для иллюстрации на рис. 7.19 показаны расчетные (сплошные линии) и экспериментальные значения (крестики) АЧХ ПА некоторых параметрических приборов (см. табл. 6), частоты накачки которых существенно отличались (приведены средние значения частоты накачки $f = (f_1 + f_2)/2$. Уровни звуковых давлений p измерялись на различных расстояниях z . Видно, что при фиксированных значениях амплитуд волн накачки $p_{01, 02}$ и частот накачки $f_{1, 2}$ амплитуда ВРЧ растет с увеличением F .

Анализируя графики АЧХ (см. рис. 7.19) можно сделать заключение о принципиальной возможности перекрыть с помощью одной ПА почти весь диапазон частот РПА. Свойство широкополосности ПА уже используется для реализации видовой классификации рыбных скоплений (приборы типа ПГЛ, НГА и РаСО-30). Использование широкополосности ПА для видовой классификации рыбы связано с тем обстоятельством, что сила цели TS зависит от частоты облучения. Отдельно следует выделить возможности широкополосного излучения ПА в режиме самодетектирования.

Параметрические антенны позволяют излучать широкополосные когерентные сигналы (например, с амплитудной и фазовой модуляцией и манипуляцией) узким направленным лучом. Рассмотрим работу ПА в режиме излучения некоторых типов сложных сигналов.

Пусть на преобразователь накачки поданы (см. рис. 2.8) два сигнала: монохроматический с круговой частотой ω_1 и линейно-частотно-модулированный (ЛЧМ). В ЛЧМ сигнале фаза, как обычно, меняется во времени в пределах импульса длительностью τ_0 по закону

$$\varphi(t) = \omega_0 t + \beta t^2/2, \quad 0 \leq t \leq \tau_0,$$

где ω_0 — нижняя граничная частота; $\beta = \delta/\tau_0$ — скорость изменения частоты; δ — девиация частоты. На преобразователь накачки подается сигнал (граничное условие для решения уравнения Хохлова—Заболотской—Кузнецова)

$$p(z=0, t) = A_0 \{\cos \omega_1 t + \cos [\varphi(t)]\}. \quad (7.31)$$

Нелинейное взаимодействие спектральных составляющих сложного сигнала (7.31) приводит к тому, что РПА излучает ЛЧМ-сигнал [22, 60]. Решение для звукового давления ВРЧ в ближней и дальней зонах на оси ПА, справедливое для интервала времени $0 \leq t \leq \tau_0$, записывается в форме [28] следующих выражений:

$$p(z, t) = \frac{\varepsilon A_0^2 l_3 \Omega_n}{4\rho c^4} \left[1 - \exp\left(-\frac{z}{l_3}\right) \right] \left(1 + \frac{\beta}{\Omega_n} t \right) \sin\left(\Omega_n t + \frac{\beta t^2}{2}\right); \quad (7.32)$$

$$p(z, t) = \frac{\varepsilon A_0^2 l_3 a^2 \Omega_n^2}{8\rho c^4 z} \left[\left(1 + \frac{\beta}{\Omega_n} t \right)^2 \cos\left(\Omega_n t + \frac{\beta t^2}{2}\right) + \frac{\beta}{\Omega_n^2} \sin\left(\Omega_n t + \frac{\beta t^2}{2}\right) \right], \quad (7.33)$$

где Ω_n — нижняя граничная частота, от которой начинается свипирование в ВРЧ. Из выражений (7.32), (7.33) видно, что звуковое давление ВРЧ в ближней и дальней зонах на оси ПА представляет собой ЛЧМ-сигнал. В ближней зоне возникает дополнительная амплитудная модуляция, в дальней зоне — кроме того и фазовая модуляция. Более полное решение этой задачи показывает, что в ближней зоне ширина ДН для сложного сигнала слабо зависит от Ω и практически совпадает с угловой шириной пучка накачки. В дальней зоне тип модуляции параметрического излучения в некоторой мере зависит от угла наблюдения.

Аналогичным образом может быть получена параметрическая трансформация типа модуляции для различных видов амплитудной, фазовой модуляций и манипуляций. Некоторые из этих видов сигналов имеют те или иные преимущества при оптимальной обработке сигналов в гидроакустической аппаратуре.

ПА в режиме самодетектирования, сохраняя свои основные положительные качества, излучает широкополосный сигнал, что можно использовать для разнообразных практических применений в РПА [19, 21]. Эхограммы записи рыбы и дна на глубине 1200 м в режиме параметрического излучения рыбопоискового эхолота «Сарган-ЭМ» приведены на рис. 11.7.

Волны накачки с огибающей $f(\Omega\tau)$ по-разному дифрагируют и затухают. Поэтому в каждой точке ПА меняется форма (следовательно, и спектр) самодетектированного импульса. В ближней зоне ПА ($z \leq l_d$) форма и спектр его определяются первой производной по времени от квадрата функции огибающей ($\sim \partial f^2(\Omega\tau)/\partial\tau$). В дальней зоне ($z \gg l_d$) при $B(\Omega) \ll 1$ на оси ПА самодетектированный сигнал стабилизируется и становится пропорциональным второй производной от квадрата огибающей

$$p(z, \tau, \theta = 0) = \frac{\varepsilon a^2 p_0^2}{16c^4 \rho^4 z_3} \frac{\partial^2}{\partial \tau^2} f^2(\Omega\tau). \quad (7.34)$$

Эксперименты количественно подтверждают отмеченные закономерности. Для иллюстрации на рис. 7.20 показаны в форме записей на самописец и осциллограф последовательные этапы трансформации формы (см. рис. 7.20, а) и спектра (см. рис. 7.20, б) прямоугольного импульса длительностью 25 мкс с частотой заполнения $f_0 = 2,08$ МГц при изменении расстояния пробега импульса $z = l_d$, $3l_d$ и $5l_d$. На рис. 7.20, в для сравнения приведена форма

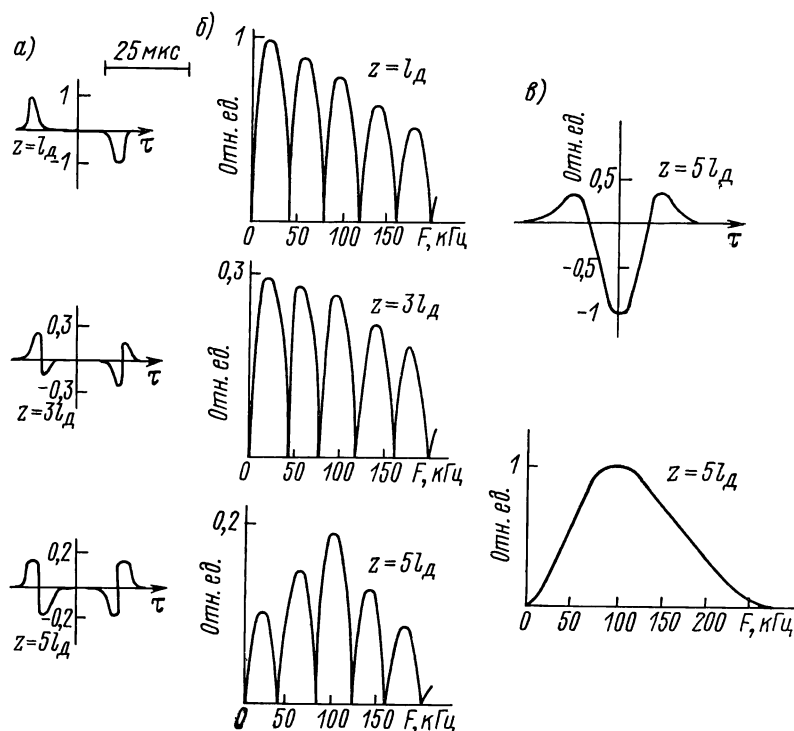


Рис. 7.20. Последовательные этапы трансформации формы (а) и спектра (б) самодетектированных прямоугольного (а, б) и колоколообразного (в) импульсов на оси ПА при указанных расстояниях z (эксперимент).

и спектр НЧ-сигнала самодетектированного колоколообразного импульса в дальней зоне для $z = 5l_d$. Анализ графиков показывает, что в результате самодетектирования в водной среде появляются широкополосные импульсы, форма которых меняется при изменении расстояния и угла θ . Энергия этих импульсов сосредоточена в НЧ-области (в данном случае в полосе от 0 до 200 кГц).

В заключение следует сказать о влиянии характеристик среды и вопросах оптимизации ПА. Из расчетных соотношений (7.28)—(7.34) видно, что амплитуда ВРЧ зависит от параметров среды и, в частности, от нелинейного параметра ε . Однако в реальных условиях колебания температуры и солености практически не

изменяют параметра ϵ . Более сильное влияние на ϵ может оказывать на определенных частотах накачки податливая среда в виде включений пузырьков воздуха. Вопрос влияния изменения скорости звука c и плотности ρ в океане на характеристики ПА в должной мере не исследован. Для условий РПА можно считать, что c и ρ в области взаимодействия не меняются.

Эффективность ПА зависит не столько от параметров среды, сколько от выбора частот накачки, соотношения F/f , размеров излучателей, мощности накачки, типа модуляции и др. Казалось бы имеется естественный путь увеличения амплитуды ВРЧ p с помощью увеличения мощности сигнала накачки. Однако, как выяснилось, это не приводит к улучшению энергетических характеристик ПА из-за формирования в накачке пилообразной волны и в результате сильного влияния нелинейного затухания [28, 60]. Последнее приводит к резкому уменьшению эффективной длины ПА, падает уровень излучения, появляются провалы в ДН, увеличивается ее ширина и пр. Как показывают многочисленные исследования, режим, исключающий насыщение, является наиболее предпочтительным, так как позволяет использовать все достоинства ПА. Применяя правило Мэнли—Роу [28], справедливое для плоских волн, можно показать, что при преобразовании частоты в низ, характерном для ПА, отношение энергии НЧ-сигнала и энергии волн накачки не может быть больше отношения F/f . В созданных приборах с ПА эффективность по порядку величины приближается к этому значению.

Выбор характеристик ПА зависит от назначения конкретной антенны. Ниже приведены численные примеры расчета характеристик ПА в том числе и серийной РПА «Пескарь» и «Сарган-ЭМ».

Начнем с примеров расчета основных параметров и характеристик ПА прибора «Пескарь».

По техническому заданию требовалось создать малогабаритную гидроакустическую станцию для поиска и оценки количества рыбных скоплений во внутренних водоемах и на шельфе морей. Рыболокатор должен под килем и в стороне от судна в условиях мелкоководья обеспечивать обнаружение одиночной рыбы с эквивалентным радиусом отражения $R_a = 0,1$ м на дистанции $z = 100$ м с коэффициентом надежности $k_d = 2$ при уровне приведенных акустических помех $p_{по} = 0,1$ Па. Задача могла быть решена только с помощью ПА. В соответствии с требованиями гл. 6 была выбрана рабочая частота $F = 50$ кГц. Вопрос выбора частот накачки $f_{1,2}$ решался с учетом необходимой величины коэффициента преобразования, направленности и полосы пропускания. Оптимальным является отношение $f/F = 5-10$ [60, 93]. Выбираем частоты накачки $f_1 = 250$ кГц, $f_2 = 30$ кГц. Длительность зондирующих импульсов $\tau_n = 1$ мс, ширина ДН в режиме излучения $2\theta_{0,7} = 5^\circ$ и приема $2\theta_{0,7}^{пр} = 40^\circ$ и форма преобразователя накачки выбиралась из условий обеспечения необходимой разрешающей способности, производительности поиска, с учетом скорости судна, качки, габаритов и массы антенной системы и т. д.

Пример 7.1. Рассчитать акустическую мощность W_a по каждой из частот накачки, необходимую для обеспечения требуемой дальности действия. Для расчета W_a воспользуемся формулой (5.8). Звуковое давление p , создаваемое в дальней зоне $z > z_d$ ПА в точке $z = 100$ м, можно оценить по выражению (7.28), записанному в виде

$$p = \alpha \rho_{01} \rho_{02} \exp(-z/L_3) L_d I(B, z_3), \quad (7.35)$$

где $I(B, z_3)$ — интеграл в выражении (7.28); $\alpha = \varepsilon/2\rho c^3$. Совокупность рассчитанных на ЭВМ кривых $I(B, z_3)$ для различных сочетаний параметров B, z_3 и есть номограммы рис. 7.11, а, б для расчета звукового давления ВРЧ в дальней зоне ПА при $z \gg l_d$, на рис. 7.11, в, г — то же для ближней зоны.

Подставляя выражение (7.35) в формулу (5.8), после преобразований [32, 33] получается следующая расчетная формула (в системе СИ):

$$W_a = \frac{z \cdot 10^{0,05\beta z} k_\delta P_{п.о} \cdot 10^3 8c^3}{\exp(-z/L_3) \cdot I(B, z_3) F^3 \varepsilon \pi R_9 \sqrt{\gamma_{п\gamma}}}, \quad (7.36)$$

где $\gamma_{п}$ — коэффициент концентрации приемной антенны. Определяем среднюю частоту и длину волны накачки $f_0 = (f_1 + f_2)/2 = (250 + 300)/2 = 275$ кГц, $\lambda = c/f_0 = 1,5 \cdot 10^3/275 \cdot 10^5 = 0,545 \cdot 10^{-2}$ м. Выбираем круглый поршневой преобразователь накачки, тогда его диаметр $2a = 60\lambda_0/2\theta_{0,7} = 60 \cdot 0,545 \cdot 10^{-2}/5 = 6,5 \cdot 10^{-2}$ м. Площадь преобразователя накачки равна $S = \pi a^2 = 3,14 \cdot 10,56 \cdot 10^{-4} = 33,166 \cdot 10^{-4}$ м². Определим длину зоны дифракции волны накачки и ВРЧ $l_d = S/\lambda_0 = 33,166 \cdot 10^{-4}/0,545 \cdot 10^{-2} = 0,61$ м, длина ВРЧ $\Lambda = c/f = 1,5 \cdot 10^3/5 \cdot 10^4 = 0,03$ м, $L_d = 0,055$ м. Коэффициент затухания для пресной воды на средней частоте накачки $\beta_0 = 20 \times 10^{-15} f_0^2 = 1,89 \cdot 10^{-3}$ м⁻¹; то же для ВРЧ $\beta_- = 6,25 \cdot 10^{-5}$ м⁻¹ = 5,425 дБ/м. Найдем

длину зоны затухания волны накачки $l_3 = 1/(2\beta_0 - \beta_-) = 270$ м и волны разностной частоты $L_3 = 1/\beta_- = 1/6,25 \cdot 10^{-5} = 1,6 \cdot 10^4$ м. Определим коэффициент концентрации приемной антенны [64], при этом ее диаметр по соображениям унификации выбираем равным диаметру излучающих элементов $\gamma_{п} = 4\pi S/\lambda^2 = 22,5$. Рассчитываем значения аргументов функции $I(B, z_3) z_3 = z/l_3 = 100/270 = 0,37$; $B = L_d/l_3/l_d^2 = 0,055 \cdot 270/0,61^2 = 40,3$. По номограммам рис. 7.11, б находим $I(B, z) = 0,19$. В итоге акустическая мощность по каждой из частот накачки равна

$$W_a = \frac{100 \cdot 10^{0,05 \cdot 0,00545 \cdot 100} \cdot 2 \cdot 2 \cdot 10^3 \cdot 8 \cdot (1,5 \cdot 10^3)^3}{\exp(-100/1,6 \cdot 10^4) \cdot 0,19 \cdot 125 \cdot 10^{12} \cdot 3,5 \cdot 3,14 \cdot 0,1 \sqrt{10^{-3} \cdot 22,5}} \approx 70 \text{ Вт.}$$

Пример 7.2. Рассчитать распределение звукового давления ВРЧ на оси ПА прибора «Пескарь». Мы рассчитали W_a из условия обеспечения требуемой дальности обнаружения. Теперь по значению W_a оценим приведенные к расстоянию 1 м уровни звукового давления $p_{1,2\text{пр}}$ волн накачки. Для круглого поршневого

излучателя накачки $p_{1,2\text{пр}} = \sqrt{W_a 2\rho c \gamma_{п}/4\pi} = \sqrt{W_a S f_0^2 \cdot 1,33} = \sqrt{70 \cdot 33,17 \cdot 10^{-4} \cdot 275^2 \times 10^6 \cdot 1,33} = 1,53 \cdot 10^5$ Па. Отсюда амплитуды звукового давления волн накачки должны быть равны $p_{01, 02} = p_{1,2\text{пр}}/l_d = 1,53 \cdot 10^5/0,61 = 2,51 \cdot 10^5$ Па. Прежде чем рассчитывать распределение звукового давления ВРЧ следует убедиться, что при полученных значениях $W_a, p_{01, 02}$ и S не превышаются порог кавитации (см. табл. 5), предельная механическая прочность пьезокерамики и порог образования разрыва [60, 93]. Значения интенсивности волн накачки ($I \approx 4,24$ Вт/см²) и $p_{01, 02}$ меньше указанных ограничивающих факторов, поэтому можно продолжить расчет. В противном случае пришлось бы увеличить площадь преобразователя накачки S , уменьшить $p_{01, 02}$ и повторить расчет.

Расчет осевого распределения ВРЧ проводится в два этапа — соответственно для ближней и дальней зоны ПА.

В ближней зоне расчет осевого распределения амплитуд ВРЧ проводится по следующему выражению, полученному для условия ближней зоны [60, 93]:

$$p = \alpha \Omega p_{01} p_{02} l_d I(z/l_d, \omega/\Omega). \quad (7.37)$$

Номограммы для вычисления функции $I(z/l_d, \omega/\Omega)$ приведены на рис. 7.11, в, г.

Подставляя численные значения при различных z , можно рассчитать осевое распределение p в ближней зоне. В приборе «Пескарь» для $z = 0,3$ м при $z/l_d = 0,5$ и $\omega/\Omega = 5,5$ значение функции $I(z/l_d, \omega/\Omega) \approx 0,19$ (см. рис. 7.11, в), тогда $p = 6252,5 \cdot 0,19 \approx 1188$ Па, что близко к экспериментальным значениям рис. 7.13.

В дальнем поле расчет осевого распределения ВРЧ производится по формуле (7.35) и соответственно номограммам рис. 7.11, а, б. Например для

$z=135$ м величина $z_3=0,5$. При $B=40,3$ значение функции $I(B, z_3)=0,15$, тогда $p=84$ Па.

Пример 7.3. Рассчитать ширину ДН ПА прибора «Пескарь». Ширина ДН по уровню 0,7 рассчитывается по формуле, получающейся из (7.28), (7.29)

$$2\theta_{0,7} = 4\theta_n / \sqrt{kI_3}, \quad (7.38)$$

где значения θ_n находятся по номограммам рис. 7.12. Воспользуемся расчетными величинами предыдущих примеров. При $B=40,3$ по номограммам величина $\theta_n=5,8$. Тогда расчетная ширина ДН равна $2\theta_{0,7}=4\theta_n/\sqrt{2\pi F l_3/c}=4 \cdot 5,8/\sqrt{2 \cdot 3,14 \cdot 5 \cdot 10^4 \cdot 270/1,5 \cdot 10^3}=0,097$ рад $=5,56^\circ$, что примерно соответствует экспериментально полученной ширине ДН на рис. 7.15.

В качестве второго задания приведем примеры расчета основных характеристик ПА широкополосного измерительного излучателя типа НАИ [60, 87, 91].

Измерительные параметрические излучатели типа НАИ относятся к вспомогательной аппаратуре (см. § 2.7). Они применяются для измерения и контроля характеристик антенн РПА в условиях гидроакустических бассейнов и полигонов [60]. Отличие расчета от предыдущих примеров состоит не только в свойстве широкополосности, но и выборе предельных значений амплитуд волн накачки, длины зоны затухания и дифракции.

Итак, требуется рассчитать основные характеристики ПА измерительного гидроакустического излучателя (аналог—прибор НАИ-6 [60]), имеющего следующие параметры: диапазон ВРЧ $F=1-150$ кГц; средняя частота накачки $f_0=1,19$ МГц; диаметр плоского преобразователя накачки $2a=0,03$ м; контрольная точка измерения в гидроакустическом бассейне на расстоянии $z=3$ м.

Пример 7.4. Рассчитать амплитудно-частотную характеристику ПА и амплитуду ВРЧ в точке $z=3$ м на частоте $F=10$ кГц. Определим длину зоны дифракции волн накачки $L_d=\pi f_0 a^2/c=3,14 \cdot 1,19 \cdot 10^6 \cdot 2,25 \cdot 10^{-4}/2 \cdot 1,5 \cdot 10^3=0,56$ м. Оценим предельный уровень звукового давления волн накачки $p_{01,02}$, исходя из условия образования ударного порога в зоне $z \leq L_d$ (далее начнется сферическое расхождение) $p_{01}=p_{02}=2,23 \cdot 10^{11}/f_0 L_d=2,23 \cdot 10^{11}/1,19 \cdot 10^6 \cdot 0,56=3,34 \cdot 10^5$ Па. Находим площадь преобразователя накачки $S=\pi a^2=3,14 \cdot 2,25 \cdot 10^{-4}=7,07 \cdot 10^{-4}$ м² и предельную акустическую мощность накачки $W_a=0,75 p_{01}^2/S f_0=0,75 \cdot 3,34^2 \times 10^{10}/7,07 \cdot 10^{-4} \cdot 1,19 \cdot 10^{12}=83,6$ Вт. При этом интенсивность $I_a=W_a/S=11,8$ Вт/см². Эта интенсивность на пределе порога кавитации (см. табл. 5), но меньше порога механической прочности пьезокерамики.

Рассчитаем длину зоны дифракции ВРЧ при $F=10$ кГц $L_d=\Omega a^2/4c=6,28 \times 10^4 \cdot 2,25 \cdot 10^{-4}/6 \cdot 10^3=2,35 \cdot 10^{-3}$ м, и соответствующие протяженности зон затухания волн накачки и ВРЧ для пресной воды $l_3=1/2 \cdot 25 \cdot 10^{-15} \cdot 1,19 \cdot 10^{12}=14$ м; $L_3=1/25 \cdot 10^{-15} \cdot 10^8 \cdot 4 \cdot 10^5$ м. Для расчета p по выражению (7.35) найдем B и z_3 : $B=\Omega l_3/2\omega l_d=10^4 \cdot 14/2 \cdot 1,19 \cdot 10^6 \cdot 0,56=0,105$; $z_3=z/l_3=3/14=0,21$. По номограмме рис. 7.11, а величина $I(B, z_3)=3,5$. Тогда предельная амплитуда звукового давления ВРЧ при $F=10$ кГц и $z=3$ м $p=5,19 \cdot 10^{-13} \cdot 6,28 \cdot 10^4 \cdot 11,2 \cdot 10^{10} \cdot 2,35 \times 10^{-3} \exp(-3/4 \cdot 10^5) \cdot 3,5=30$ Па или $p=29,5$ дБ. Для построения АЧХ проводим аналогичные вычисления на других разностных частотах. Например, для $F=50$ кГц, $L_d=1,17 \cdot 10^{-2}$ м, $B=0,525$, $I(B, z_3)=2,3$ и $p=495$ Па или 53,9 дБ; для $F=100$ кГц $L_d=2,35 \cdot 10^{-2}$ м, $B=1,05$, $p=1600$ Па или 64 дБ. На рис. 7.21 представлена АЧХ (кривая 1) ПА, построенная по результатам данного расчета для максимальных амплитуд волн накачки, соответствующих ударному порогу. В приборе — аналоге НАИ-6 [60] для стабильности его работы амплитуды исходных волн накачки выбраны $p_{01}=p_{02}=136 \cdot 10^5$ Па. Соответственно $W_a=14$ Вт и $I \approx 2$ Вт/см² в шесть раз меньше, чем в расчетном примере. Величина $p=W_a$, поэтому легко произвести перерасчет и построить расчетную АЧХ прибора НАИ-6 (кривая 2). Последняя совпадает с экспериментальными данными.

Пример 7.5. Рассчитать распределение максимально возможного уровня звукового давления на оси ПА и осевое распределение p для прибора НАИ-6 при $F=10$ кГц. Для расчетов используем численные значения предыдущего примера.

Распределение на оси в ближней зоне рассчитываем по формуле (7.37). Находим снижение по частоте $\omega/\Omega = 1,19 \cdot 10^6 / 10^4 \approx 120$. Задаемся серией значений отношения z/l_d для последующей оценки функции $I(z/l_d, \omega/\Omega)$ по номограммам рис. 7.11, в, г. Например, при $z/l_d = 0,1$ значение функции $I(z/l_d, \omega/\Omega) = 0,0154$, при этом $z = 0,056$ м и $p = 5,19 \cdot 10^{-13} \cdot 6,28 \cdot 10^4 \cdot 11,2 \cdot 10^{10} \cdot 0,56 \cdot 1,54 \cdot 10^{-2} = 31,6$ Па. При $z/l_d = 0,5$, $z = 0,25$ м и $p = 2,05 \cdot 10^{-3} \cdot 0,0213 = 43,7$ Па; при $z/l_d = 1$ $z = 0,56$ м и $p = 2,05 \cdot 10^3 \cdot 0,0222 = 45,5$ Па; при $z/l_d = 2$ $z = 1,12$ м и $p = 2,05 \cdot 10^3 \cdot 0,0212 = 43,4$ Па.

В дальней зоне распределение p на оси считается так же как в предыдущих примерах. Задавшись $z_3 = 0,1$ и, зная $B = 0,105$, находим по номограммам рис. 7.11 значение $I(B, z_3) = 4$, тогда при $z = z_3 l_3 = 0,1 \cdot 14 = 1,4$ м предельная величина $p = 8,6 \cdot 4 = 34,4$ Па. При $z_3 = 0,5$ $z = 7$ м, $p = 8,6 \cdot 2,36 = 20,3$ Па; при $z_3 = 1$ $z = 14$ м, $p = 8,6 \cdot 1,44 = 12,4$ Па; при $z_3 = 2$ $z = 28$ м, $p = 8,6 \cdot 0,24 = 2,06$ Па.

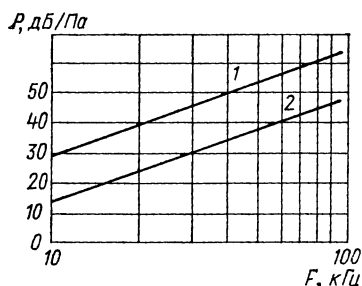


Рис. 7.21. Амплитудно-частотные характеристики широтно-полосного измерительного параметрического излучателя.

1 — предельно допустимые значения, кривая 2 — для прибора НАИ-6.

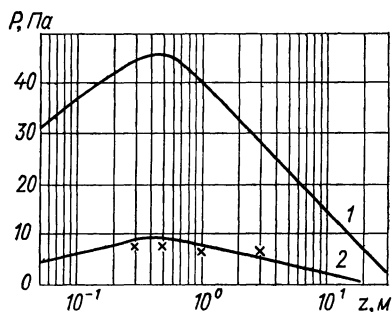


Рис. 7.22. Осевое распределение ВРЧ для параметрического измерительного излучателя.

1 — расчетные максимальные значения, кривая 2 — расчетные для НАИ-6, крестиком — эксперимент.

На рис. 7.22 представлены графики осевого распределения p для $F = 10$ кГц, где кривая 1 — расчетное распределение для предельных амплитуд волн накачки, кривая 2 — расчетное распределение для $p_{01,02} = 1,36 \cdot 10^5$ Па, соответствующее прибору-аналогу НАИ-6. Здесь же крестиками обозначены экспериментальные значения.

Пример 7.6. Рассчитать ширину ДН в рабочем диапазоне частот.

Расчет производится по выражению (7.38) при различных значениях F . Для $z = 3$ м и вычисленных в примере 4 значений $B = 0,105$ и $z_3 = 0,21$ по номограммам рис. 7.12 находим величину $\theta_n = 0,54$. Тогда ширина ДН для $F = 10$ кГц при $z = 3$ м равна $2\theta_{0,7} = 4\theta_n \cdot 360 / 2\pi \sqrt{k l_3} = 4 \cdot 0,54 \cdot 360 / 6,28 \sqrt{6,28 \cdot 10^4 \times 14 / 1,5 \cdot 10^3} \approx 5^\circ$.

Аналогичный расчет для $F = 50$ кГц дает $B = 0,525$, $z_3 = 0,21$, $\theta_n = 0,86$ и $2\theta_{0,7} = 3,6^\circ$; для $F = 100$ кГц — $B = 1,05$; $z_3 = 0,21$, $\theta_n = 1,08$ и $2\theta_{0,7} = 3,3^\circ$. Экспериментальные и расчетные кривые зависимости ширины ДН в полосе рабочих частот для ПА приборов типа НАИ и ПГЛ приведены в [60, 61, 93].

Пример 7.7. Рассчитать спектр самодетектированного импульса, излучаемого в режиме параметрического излучения эхолотом «Сарган-ЭМ».

Из выражений (7.28), (7.34) следует формула для инженерных расчетов спектральной плотности $A(F)$ звукового давления самодетектированного сигнала

$$A(F) = DS''(F) I(B, d, z_3), \quad (7.39)$$

где $D = \alpha p_0^2 a^2 \exp(-Z/L_3) / 8c$; $S''(F) = \Omega^2 (2\pi)^{-1} \int_{-\infty}^{\infty} f^2(\Omega t) \exp(-i\Omega t) dt -$

Фурье-преобразование второй производной по времени от квадрата огибающей; $I(B, d, z_3)$ — значение интеграла в (7.28). В двухчастотном эхолоте «Сарган-ЭМ» [21] в параметрическом режиме излучение производится на частоте 135 кГц, а прием осуществляется в узком ($2\Delta F = 2,5$ кГц) диапазоне вблизи частоты $F = 20$ кГц (см. § 11.3). В узкополосном приеме используется только часть энергии широкополосного самодетектированного сигнала, поэтому для оценочных расчетов можно принять

$$P = DI(B, d, z_3) \int_{F_1}^{F_2} S''(F) dF. \quad (7.40)$$

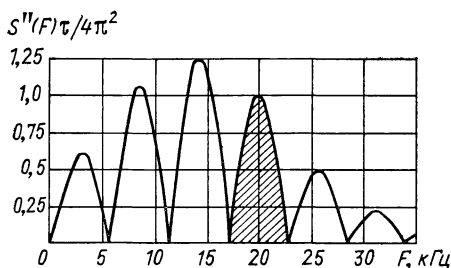


Рис. 7.23. Спектр самодетектированного сигнала в дальней зоне ПА, излучаемого в РПИ эхолотом «Сарган-ЭМ» (заштрихована принимаемая часть спектра).

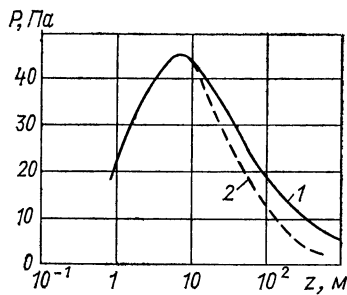


Рис. 7.24. Осовое распределение уровня звукового давления в РПИ эхолотом «Сарган-ЭМ»: 1 — пресная вода, 2 — соленая вода.

Функцию огибающей $f(\Omega\tau)$ импульсов эхолота «Сарган-ЭМ» аппроксимируем выражением [20]

$$f(t) = \begin{cases} 0, & t_0 + \tau < t < -(t_0 + \tau); \\ \sqrt{1 - \sin(\pi t/\tau)}, & -(t_0 + \tau) < t < -(t_0 - \tau); \\ 1, & -(t_0 - \tau) < t < t_0 - \tau; \\ \sqrt{\sin(\pi t/\tau) - 1}, & t_0 - \tau < t < t_0 + \tau. \end{cases} \quad (7.41)$$

где $2t_0$ — длительность импульса; 2τ — время нарастания и убывания его фронтов. Тогда функция $S''(F)$ при $f(t)$ вида (7.41) равна

$$S''(F) = |4\pi^2 \sin \pi g \sin \pi g A/\tau (g^2 - 1)|, \quad (7.42)$$

где $g = F\tau/\pi$, $A = t_0/\tau$. Выражение (7.42) позволяет рассчитать спектр достаточно широкого класса самодетектированных импульсов [20]. Применительно к эхолоту «Сарган-ЭМ» ($2t_0 = 175$ мкс, $2\tau_0 = 58$ мкс, $A = 3$) спектр самодетектированного сигнала в дальней зоне ПА приведен на рис. 7.23.

Из графиков видно, что в результате самодетектирования излучаемых в параметрическом режиме на частоте 135 кГц импульсов в самой среде генерируется низкочастотный широкополосный сигнал, имеющий спектр от нуля до нескольких десятков килогерц. В данном спектре содержатся определенные области частот, где сосредоточена значительная часть энергии самодетектированного сигнала. В эхолоте «Сарган-ЭМ» параметры излучаемых импульсов на частоте 135 кГц выбраны таким образом, чтобы в АЧХ приемной НЧ антенны на частоте 20 кГц попадала энергия одного из максимумов самодетектированного импульса (заштрихованная часть на рис. 7.23).

Пример 7.8. Рассчитать приведенный уровень звукового давления самодетектированного импульса и осевое распределение p для параметрического режима эхолота «Сарган-ЭМ».

Исходными данными для использования формулы (7.40) применительно к «Саргану-ЭМ» являются: $a=0,166$ м, $p_{эф(1 м)}=3 \cdot 10^5$ Па, $2t_0=175$ мкс, $2\tau_0=58$ мкс и график функции $S''(F)$ на рис. 7.23. Рассчитываем интеграл в (7.40) численным методом в виде площади заштрихованной части рис. 7.23

$$\int_{F_1}^{F_2} S''(F) dF = S''(F=20 \text{ кГц})_{0,7} \Delta F = \frac{0,7 \cdot 4 \cdot 3,14^2 \cdot 5700}{29 \cdot 10^{-6}} = 5,6 \cdot 10^9.$$

Используя исходные данные, рассчитываем параметры p_0 , l_d , L_d , l_3 , L_3 , B , d , z_3 и, наконец, по номограммам находим численные значения функции I соответственно для ближней и дальней зоны ПА по аналогии с расчетным примером 2. Затем, подставляя найденные числовые величины в формулу (7.40), находим p при различных z и строим соответствующие графики (рис. 7.24) осевого распределения уровня звукового давления в пресной (кривая 1) и соленой (кривая 2) водах. Из графиков видно, что осевое распределение p в режиме параметрического излучения аналогично обычным ПА (сравните с рис. 7.13, 7.14, 7.22). В соленой воде из-за большого поглощения уровень p меньше, чем в пресной воде.

Приведенный к 1 м уровень звукового давления $p_{пр}$ для ПА следует рассчитывать по величинам давления, получаемым в дальней зоне ($z \gg l_d$), где прекращается подкачка сигнала ВРЧ от энергии исходных волн и начинается сферическое расхождение ВРЧ. Для заданных условий величина $p_{пр}=(2-2,5) \cdot 10^3$ Па. Этот уровень оказался достаточным для лоцирования в параметрическом режиме рыбных скоплений и дна на глубине 1200 м (см. например, рис. 11.7) при $2\theta_{0,7} \approx 2,5^\circ$.

Глава 8

ПАРАМЕТРЫ АППАРАТУРЫ В РЕЖИМЕ ПРИЕМА

§ 8.1. Методы и характеристики пеленгования в режиме приема

Практически все применяемые в РПА гидроакустические АС являются обратимыми. Это свойство позволяет путем поочередного циклического переключения одной и той же АС в режимы излучения и приема значительно снизить массу, габариты и стоимость антенных систем РПА.

Выражение для ДН в режиме приема $D_{\Pi}(\varphi, \theta)$ представляет собой отношение электрических напряжений U , возникающих на выходе антенны при приеме акустических колебаний с какого-либо произвольного направления φ, θ и с некоторого фиксированного направления φ_1, θ_1 , обычно соответствующего максимуму сигнала (при этом предполагается, что интенсивность и расстояние до источника акустических колебаний постоянны)

$$D_{\Pi}(\varphi, \theta) = U(\varphi, \theta) / U(\varphi_1, \theta_1). \quad (8.1)$$

При отсутствии взаимодействия по полю между элементами АС (к чему стремятся при конструировании) аналитические

выражения для ДН в режимах приема и излучения [79] совпадают (см. § 7.1).

Для оценки помехоустойчивости антенны при приеме сигналов на фоне помех используется параметр, называемый коэффициентом осевой концентрации в режиме приема $\gamma_{\text{п}}$. При работе антенны в условиях воздействия изотропной помехи и ориентации максимума ДН в направлении на источник сигнала выражение для $\gamma_{\text{п}}$ имеет вид [78, 79]

$$\gamma_{\text{п}} = (W_{\text{с}}/W_{\text{п}}) (I_{\text{п}}/I_{\text{с}}), \quad (8.2)$$

где $W_{\text{с}}$ и $W_{\text{п}}$ — мощности сигнала и помехи на выходе АС; $I_{\text{п}}$ и $I_{\text{с}}$ — интенсивности помехи и сигнала, замеренные ненаправленным приемником в отсутствие антенны. Очевидно, что в случае изотропной помехи отношение сигнал/помеха по мощности на выходе АС пропорционально величине $\gamma_{\text{п}}$. Если в режимах излучения и приема форма и апертура АС и законы амплитудного распределения остаются неизменными, то для $\gamma_{\text{п}}$ справедливы соотношения (7.13) — (7.16) [78, 79].

Направленные свойства АС в режиме приема используются для решения одной из основных задач РПА — пеленгования объекта поиска (определения его угловых координат). Определение направления на цель в РПА чаще всего осуществляется путем изменения положения ДН антенны в плоскости пеленгования до достижения на выходе приемного тракта максимальной амплитуды сигнала от цели (максимальный метод пеленгования). Зафиксированное при этом пространственное положение ДН и является пеленгом цели. Зависимость выходного направления приемного тракта $U(\varphi)$ от величины угла между осью ДН и направлением на цель называется пеленгационной характеристикой. Для режима шумопеленгования эта характеристика описывается выражением

$$U(\varphi) = U_{\text{max}} D_{\text{п}}, \quad (8.3)$$

где U_{max} — максимальное напряжение, получаемое при ориентации ДН на источник звука.

В гидролокационных устройствах амплитуда $U(\varphi)$ при увеличении отклонения ДН от направления на цель уменьшается быстрее, чем по (8.3) вследствие направленного излучения. В этом случае

$$U(\varphi) = U_{\text{max}} D_{\text{и}} D_{\text{п}}. \quad (8.4)$$

Если ДН в режимах излучения и приема одинаковы, то

$$U(\varphi) = U_{\text{max}} D^2. \quad (8.5)$$

Крутизна пеленгационной характеристики $S_{\text{п}} = dU(\varphi)/d\varphi$ в области максимума ДН называется пеленгационной чувствительностью. Так как эта величина при совпадении максимума ДН с направлением на цель равна нулю, то существует определенный угол $\Delta\varphi$, при отклонении на который оператор РПА или решающий автомат уверенно фиксирует уменьшение амплитуды си-

гнала. Величиной угла $\Delta\varphi$ можно характеризовать точность пеленгования. Для максимального метода пеленгования [41]

$$\Delta\varphi = 0,6 \sqrt{\mu} 2\theta_{0,7}, \quad (8.6)$$

где $\mu = 1 - U(\Delta\varphi)/U_{\max}$. При использовании оператором визуального индикатора $\mu = 0,05 \div 0,15$, для слухового индикатора $\mu \geq 0,2$ [41].

Пример 8.1. Оценим точность $\Delta\varphi$ максимального метода пеленгования низкочастотным и высокочастотным трактами гидролокатора «Сарган-Г», для которых соответственно $2\theta_{0,7} = 14^\circ$ и 4° . При пеленговании на слух для низкочастотного тракта $\Delta\varphi = 0,6 \cdot \sqrt{0,2} \cdot 14 = 3^\circ 45'$, для высокочастотного — $\Delta\varphi = 0,6 \sqrt{0,2} \times 4 = 1^\circ$.

При необходимости получения более высокой точности пеленгования, например, в устройствах автоматического сопровождения цели, можно использовать метод равносигнальной зоны. В этом случае прием сигналов осуществляется либо двумя идентичными антеннами, развернутыми одна относительно другой на определенный угол $\varphi_{\text{см}}$ таким образом, чтобы их ДН перекрывались на некотором заданном уровне, либо одной многоэлементной АС с электронным ДФУ, позволяющим одновременно сформировать две перекрывающиеся ДН (рис. 8.1, а). Пеленгование осуществляется путем определения разности напряжений $\Delta U = U_1 - U_2$ (точки 1 и 2 на рис. 8.1, а) на выходах приемных трактов антенны (в первом случае) или на выходах соответствующих каналов ДФУ (во втором случае). При нахождении цели на линии, проходящей через точку пересечения ДН и называемой линией равносигнального направления, сигналы обоих каналов равны. При отклонении цели на угол $\Delta\varphi$ от линии равносигнального направления

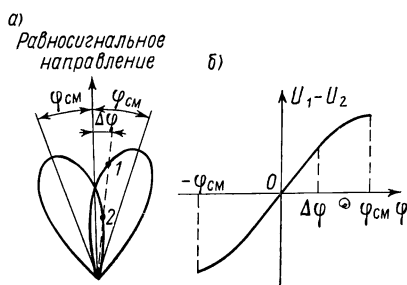


Рис. 8.1. Пеленгование методом равносигнальной зоны: а — пространственное положение ДН; б — пеленгационная характеристика.

$$\Delta U = U_1 - U_2 = U_{\max} D_{\Pi}(\varphi_{\text{см}} - \Delta\varphi) - U_{\max} D_{\Pi}(\varphi_{\text{см}} + \Delta\varphi). \quad (8.7)$$

Пеленгационная характеристика метода равносигнальной зоны приведена на рис. 8.1, б. Ее крутизна, а, следовательно, и пеленгационная чувствительность максимальны при ориентации линии равносигнального направления на цель (в этом случае $\Delta U = 0$). Угол $\Delta\varphi_{\min}$, при котором оператор или автоматическое устройство уверенно фиксирует наличие разницы в напряжениях U_1 и U_2 , определяется выражением [41]

$$\Delta\varphi_{\min} = 0,089\mu (2\theta_{0,7})^2 / \varphi_{\text{см}}, \quad (8.8)$$

где $\mu = |U_1 - U_2| / U_{\max} D_{\Pi}(\varphi_{\text{см}})$. При пеленговании оператором величина μ соответствует приведенным выше значениям для

максимального метода пеленгования. При использовании автоматического устройства величина μ определяется техническими характеристиками последнего и, прежде всего, его чувствительностью. Точность пеленгования, определяемая величиной $\Delta\varphi_{\min}$, тем лучше, чем больше $\varphi_{\text{см}}$. Обычно величину $\varphi_{\text{см}}$ выбирают равной $(0,5—0,7) \cdot 2\theta_{0,7}$, так как при больших значениях $\varphi_{\text{см}}$ и ориентации на цель вблизи равносигнального направления уменьшаются амплитуды полезных сигналов в приемных каналах, в результате чего недопустимо падает отношение сигнал/помеха. Точность пеленгования можно повысить, используя более узкие исходные ДН, однако при этом уменьшается область захвата устройства пеленгования.

Пример 8.2. Оценим точность пеленгования методом равносигнальной зоны для низкочастотного тракта гидролокатора «Сарган-Г» при $\varphi_{\text{см}} = 0,6 \cdot 2\theta_{0,7}$ и использовании слухового индикатора $\Delta\varphi_{\min} = 0,089 \cdot 0,2 \cdot [14^2 / (0,6 \cdot 14)] = 0,4^\circ$.

Сравнение полученного результата с результатом примера 1 показывает более высокую точность пеленгования при методе равносигнальной зоны, но при этом теряется преимущество максимального метода — возможность одновременного пеленгования и классификации цели по параметрам принятого сигнала (в гидролокаторе «Сарган-Г» принят максимальный метод пеленгования).

В некоторых случаях в РПА используется фазовый метод пеленгования. Его преимуществом является возможность определения направления на шумящий или отражающий объект без механического разворота АС или электронного поворота ее ДН. Сущность этого метода заключается в измерении разности фаз акустических колебаний, принимаемых двумя антеннами или двумя секциями одной и той же АС, фазовые центры которых отстоят друг от друга на расстояние d . При непосредственном подключении фазового детектора к двум антенным трактам выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ или пеленгационная характеристика определяется следующим выражением [25]:

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{оп}} \cos(2\pi d \sin \varphi / \lambda), \quad (8.9)$$

где $U_{\text{оп}}$ — некоторое опорное напряжение; φ — угол между направлением прихода акустических колебаний и базой, образуемой линией, соединяющей фазовые центры АС. Из выражения (8.9) видно, что при φ близком к нулю крутизна пеленгационной характеристики также стремится к нулю. Кроме того, в этом случае невозможно определить, с какой стороны от перпендикуляра к базе принимаются акустические колебания. С целью устранения этих недостатков в один из антенных трактов вводится искусственный сдвиг фазы на 90° . В этом случае

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{оп}} \sin(2\pi d \sin \varphi / \lambda). \quad (8.10)$$

Угол φ не может изменяться более, чем на величину π , в противном случае пеленгационная характеристика неоднозначна, т. е. необходимо, чтобы $\sin \varphi \leq \lambda / 2d$.

Примером использования фазового метода пеленгования может служить устройство определения отклонения в вертикальной плоскости направления на центр плотности косяка от нормали к АС в гидролокаторе Atlas Fishing Sonar 950 с последующей индикацией на электронном индикаторе.

§ 8.2. Сканирование в режиме приема

Для повышения помехоустойчивости и точности пеленгования в РПА используют приемные антенны с относительно узкими ДН. Обследование широких секторов пространства осуществляется механическим или электронным сканированием ДН (см. § 7.2).

При использовании плавного разворота АС с постоянной угловой скоростью, соответствующей выражению (7.5) при $m=1$, невозможно обеспечить уверенный прием эхосигналов из всего сек-

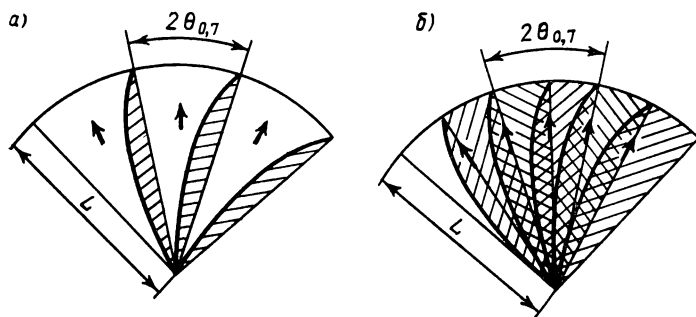


Рис. 8.2. Расположение зон уверенного приема при плавном развороте АС: а — при $m=1$; б — при уменьшенной в 2 раза угловой скорости АС.

Стрелками показаны направления осей ДН при очередном излучении.

тора обзора, так как имеется существенная разница в размерах облученного водного объема и объема, охватываемого перемещающейся в пространстве приемной ДН. Для иллюстрации на рис. 8.2, а показаны зоны уверенного приема в виде заштрихованных областей. Они занимают относительно малую долю требуемого сектора обзора $2\theta_{0,7}$. Для обеспечения приема хотя бы одного эхосигнала от цели, находящейся в любой точке требуемого сектора обзора, угловую скорость разворота по сравнению с выражением (7.5) необходимо уменьшить минимум в два раза, т. е. установить величину углового перемещения АС за период между двумя зондирующими импульсами равной $2\theta_{0,7}/2$. На рис. 8.2, б показаны зоны уверенного приема, соответствующие этому случаю. Двойная штриховка соответствует двухкратному приему эхосигналов от одной и той же цели, а одинарная штриховка — однократному приему эхосигналов. Из графических построений видно, что для

получения не менее m эхоконтактов необходимо уменьшить угловую скорость разворота АС в $(m+1)$ раз. В этом случае

$$\omega = 2\theta_{0,7}c/2(m+1)L. \quad (8.11)$$

Пример 8.3. Проанализируем поисковые возможности гидролокатора «Сарган-Г», в котором используется плавный механический разворот антенны в режиме поиска. Преобразовав выражение (8.11) к виду

$$m = (2\theta_{0,7}c/2\omega L) - 1, \quad (8.12)$$

получим, что для диапазона $L=1200$ м без включения фазировки при угловой скорости автоматического поиска $\omega=3^\circ/\text{с}$ и ширине ДН низкочастотного тракта $2\theta_{0,7}=14^\circ$ количество эхоконтактов составляет $m=[(14 \cdot 1500)/(2 \cdot 3 \cdot 1200)] - 1 \approx 2$.

При включении режима измерения дистанции с фазировкой начала диапазона частота посылок в этом гидролокаторе уменьшается приблизительно в три раза, что эквивалентно работе на диапазоне 3600 м. В этом случае $m=[(14 \cdot 1500)/(2 \cdot 3 \cdot 3600)] - 1 < 1$, т. е. прием со всего заданного сектора обзора не может быть обеспечен. Для обеспечения приема необходимо установить скорость автоматического поиска $\omega=1^\circ/\text{с}$, в результате чего минимальное количество эхоконтактов будет равно $m=[(14 \cdot 1500)/(2 \cdot 1 \cdot 3600)] - 1 \approx 2$.

При работе высокочастотным трактом ($2\theta_{0,7}=4^\circ$, $L=600$ м) для скоростей $\omega=3^\circ/\text{с}$ и $\omega=1^\circ/\text{с}$ получаем соответственно $m=[(4 \cdot 1500)/(2 \cdot 3 \cdot 600)] - 1 = 0,67$ и $m=[(4 \cdot 1500)/(2 \cdot 1 \cdot 600)] - 1 = 4$.

Таким образом, при работе гидролокатора «Сарган-Г» использование угловой скорости автоматического поиска $\omega=3^\circ/\text{с}$, не всегда допустимо.

Сканирование ДН при использовании механического шагового поиска в режимах приема и излучения имеет одинаковые особенности (см. § 7.2).

В РПА одновременного секторного или кругового обзора с многоэлементными плоскими, цилиндрическими или сферическими антеннами, формирование и изменение пространственной ориентации приемных ДН осуществляется также с помощью электронных ДФУ. В отличие от режима излучения в приеме можно одновременно формировать несколько ДН с различной пространственной ориентацией. Для этого используются многоканальные ДФУ. В состав каждого канала, предназначенного для формирования ДН с определенной ориентацией, входит аналоговое или цифровое устройство временной задержки электрических сигналов (линия задержки). Возможно также использование фазовращателей. Для плоских АС параметры временных задержек или фазовых сдвигов рассчитываются как и в режимах излучения по формулам (7.7). При этом угол θ отсчитывается между нормалью к поверхности АС и направлением приема. Влияние величины угла θ на ширину основного лепестка ДН, его уровень и коэффициент осевой концентрации АС аналогично описанному в § 7.2.

Выходы линий задержек (ЛЗ) могут непосредственно подключаться к соответствующим входам многоканального устройства усиления (при необходимости), частотной фильтрации и выделения огибающей эхосигналов. Сформированный на выходах такого устройства набор (или «веер») статических ДН позволяет наиболее полно использовать энергию эхосигнала за счет оптимизации и согласования с длительностью зондирующих импульсов пара-

метров задерживающих, фильтрующих и детектирующих устройств.

Съем информации в виде выборок огибающей эхосигналов для записи в блоки памяти или для непосредственной подачи на устройства индикации и регистрации осуществляется посредством использования бесконтактного электронного коммутатора. Согласно теореме Котельникова опрос каждого канала, соответствующего определенному направлению лоцирования, должен производиться не реже, чем два раза за период времени, равный длительности принимаемого эхосигнала. Так как последняя может в значительной степени изменяться, на практике период выборки видеосигнала $t_{в.в}$ связывают с τ_n следующей зависимостью:

$$t_{в.в} \leq (0,4 - 0,5) \tau_n. \quad (8.13)$$

В РПА с цилиндрическими АС формирование статического «веера» ДН можно производить с помощью набора ЛЗ, количество которых равно количеству одновременно формируемых ДН. В отличие от плоских антенн ЛЗ для цилиндрических АС полностью идентичны друг другу вследствие идентичности геометрических размеров рабочих секторов (см. § 7.2). Требуемые временные задержки и фазовые сдвиги можно рассчитать по формулам (7.8). Количество входов каждой ЛЗ соответствует количеству вертикальных секций в рабочих секторах АС. Каждая ЛЗ, формирующая одно из направлений обзора, соединена своими входами с секциями АС со сдвигом на одну секцию в одну и другую сторону относительно двух других ЛЗ, формирующих соседние направления обзора. Выходы каждой ЛЗ посредством электронного коммутатора последовательно по очереди подключаются к последующим трактам РПА с периодичностью, определяемой выражением (8.13), в результате чего осуществляется круговой обзор исследуемого пространства. Рассматриваемый вариант ДФУ наиболее оптимален с точки зрения обработки эхосигналов, но довольно громоздок и имеет низкую надежность из-за большого числа каналов ДФУ.

В современной РПА (например в гидролокаторе «Угорь») получил широкое распространение более простой способ электронного вращения ДН цилиндрической АС с одной ЛЗ. Отличие от аналога из режима излучения (см. § 7.2) заключается в подключении электронного коммутатора между секциями АС и входами ЛЗ. При значительно меньших аппаратных затратах в этом способе по сравнению с предыдущим предъявляются намного более высокие требования к быстродействию и шумовым свойствам элементов электронного коммутатора. Он энергетически менее выгоден вследствие сокращения времени обработки сигнала с конкретного направления во столько раз, сколько формируется пространственных направлений обзора. В целях устранения провалов между ДН (см. рис. 7.5) и уменьшения угловой дискретности отображения эхосигналов на экране электронного индикатора в ДФУ с вращением одиночной ДН используют устройства интерполирования сигналов соседних секций цилиндрической АС (см. § 10.3).

§ 8.3. Подавление дополнительных максимумов в режиме приема

Наличие дополнительных лепестков ДН в режиме приема ухудшает тактико-технические параметры РПА. Как было показано в § 7.3, большие по величине дополнительные лепестки могут быть причиной ложного пеленгования объектов промысла, увеличения протяженности принимаемых эхосигналов в приборах с внутриимпульсным сканированием и других нежелательных явлений. От доли энергии шумов, принимаемых антенной за счет наличия бокового поля, зависит соотношение сигнал/помеха, а, следовательно, и дальность обнаружения РПА. Особенно велико влияние уровня боковых лепестков в неизотропном поле помехи, как например, в РПА одновременного секторного и кругового обзора или же при работе любого гидролокатора в условиях поверхностной или донной реверберации. В этих случаях может возникнуть ситуация, когда уровень сигнала или реверберации, принимаемых каким-либо боковым лепестком, может превысить уровень полезного сигнала, принимаемого основным лепестком.

Методы подавления дополнительных лепестков в режиме приема аналогичны соответствующим методам режима излучения. При введении амплитудных распределений возможно появление амплитудных и фазовых ошибок, а также отказов элементов АС и каналов приемного тракта. Эти вопросы обсуждались в § 7.3.

В режиме приема можно дополнительно подавить боковое поле посредством специальных методов, например, мультипликативной обработкой входных эхосигналов [47]. Однако вследствие неидеальности характеристик перемножающих устройств в аппаратуре возникают дополнительные шумы и падает отношение сигнал/помеха. В результате этого, хотя известны рыбопоисковые приборы, использующие эти методы, например, эхолот Atlas Fishfinder 791DS, широкого распространения они не получили.

§ 8.4. Динамический диапазон принимаемых сигналов

Допустимая величина минимального сигнала на входе приемного тракта определяется чувствительностью по давлению ν АС или отдельного ее элемента (для многоканальных АС). Величина ν представляет собой отношение эффективного напряжения холостого хода U_0 , развиваемого на выходе АС (элемента), к эффективному звуковому давлению p_0 на поверхности АС (элемента), в результате воздействия которого возникает это напряжение

$$\nu = U_0/p_0. \quad (8.14)$$

При проектировании РПА стремятся обеспечить условие, следующее из уравнения гидролокации

$$p_0 \geq \delta p_{\text{ш}}, \quad (8.15)$$

где δ — расчетное соотношение сигнал/помеха для акустических давлений; $p_{\text{ш}}$ — эффективное значение акустического давления по-

мехи, приведенное к рабочей частоте f_p , расчетной полосе пропускания Δf приемно-усилительного тракта и коэффициенту осевой концентрации антенны в режиме приема γ_n . С учетом соотношения

$$p_{ш} = p_{ш0} (\Delta f / \gamma_n)^{1/2} / f_p \quad (8.16)$$

и выражений (8.14) и (8.15) приемный тракт должен обеспечить усиление и обработку экосигналов, минимальная величина которых может составлять

$$U_{вх. \min} = U_{э. \min} = \sqrt{\nu} p_{ш0} (\Delta f / \gamma_n)^{1/2} / f_p, \quad (8.17)$$

где $p_{ш0}$ — величина звукового давления помехи, приведенная к стандартным условиям. Формула (8.17) справедлива при условии, что мощность собственных электрических шумов приемного тракта, приведенных ко входу, намного меньше мощности электрических колебаний, возникающих на выходе антенны при воздействии акустических шумов $p_{ш}$.

На входе предварительных усилителей обычно используется защита от перегрузки в виде включенных антипараллельно полупроводниковых диодов, в результате чего максимальная величина входного напряжения $U_{вх. \max} \leq 0,5$ В. При использовании предварительных усилителей с большим коэффициентом усиления величина $U_{вх. \max}$ зависит от максимального допустимого напряжения на их выходах и может быть значительно меньше 0,5 В.

Используя известную зависимость интенсивности экосигнала от радиуса эквивалентной сферы (5.11), выражение (8.14) и зависимость звукового давления от интенсивности, можно показать, что при работе РПА по целям с постоянным радиусом эквивалентной сферы динамический диапазон принимаемых сигналов определяется следующим выражением:

$$D = U_{вх. \max} / U_{вх. \min} = r_{\max}^2 10^{0,1\beta} (r_{\max} - r_{\min}) / r_{\min}^2, \quad (8.18)$$

где r_{\max} , r_{\min} — максимальная и минимальная дистанция эхопеленгования, км; β — коэффициент затухания звука, дБ/км. Динамический диапазон приемного тракта принято выражать в децибелах

$$D (\text{дБ}) = 40 \lg r_{\max} - 40 \lg r_{\min} + 2\beta (r_{\max} - r_{\min}). \quad (8.19)$$

Для оценки максимального требуемого динамического диапазона необходимо учитывать максимально возможную на промысле величину коэффициента затухания β (см. § 5.2). Если известна максимальная дистанция пеленгования и реализуемый в проектируемом приемном тракте динамический диапазон, то минимальная дистанция, при которой обеспечивается неискаженный прием экосигналов, с достаточной степенью точности определяется следующим выражением:

$$r_{\min} = r_{\max} 10^{0,05\beta r_{\max} (D)^{-1/2}}. \quad (8.20)$$

В этом случае подразумевается, что при заданной величине r_{\max} и существующем значении β величина излучаемой акустической мощности установлена такой, чтобы принимаемый экосигнал со-

ответствовал величине, определяемой из выражения (8.17). В РПА применяются приемные тракты и с практически бесконечным динамическим диапазоном входных сигналов, в которых используется жесткое ограничение входных сигналов. Примером могут служить приемные тракты гидролокатора Atlas Fishing Sonar 950 и эхолота Atlas Fischfinder 791DS. Однако при жестком ограничении возможно значительная перекрестная модуляция сигналов и шумов, вызывающая подавление полезных сигналов, и другие вредные эффекты. Поэтому использование ограничения сигналов в общем случае нежелательно [58].

Пример 8.4. Оценим динамический диапазон предварительных усилителей гидролокатора «Прибой-101» при следующих параметрах: $\nu=200$ мкВ/Па; $\delta=2$; $p_{ш.0}=0,05$ Па; $f_p=19,7$ кГц; $\Delta f=500$ Гц и $\gamma_n=76$ ($2\theta_r=28^\circ$, $2\theta_v=14^\circ$). В этом случае по формуле (8.17)

$$U_{вх, \min} = 200 \cdot 2 \cdot 0,05 (500/76)^{1/2} / 19,7 = 2,6 \text{ мкВ.}$$

Динамический диапазон входных сигналов при условии, что $U_{вх, \max} = 0,5$ В, равен $D = 0,5/2,6 \cdot 10^{-6} = 190\,000$ или 105,6 дБ. При $\beta=3,75$ дБ/км (температура $T=4^\circ\text{C}$ и соленость $S=34\text{‰}$), $r_{\max}=3$ км и полученном динамическом диапазоне минимальная дистанция, с которой возможен неискаженный прием эхосигналов, равна $r_{\min} = 3 \cdot 10^{0,05 \cdot 3,75 \cdot 3} \cdot (190\,000)^{-1/2} = 0,025$ км.

Создание малозумных предварительных усилителей с динамическим диапазоном входных сигналов более 100 дБ представляет собой сложную техническую задачу и не всегда целесообразно. Кроме того, в реальных условиях сила цели может значительно превышать ту среднюю величину, которая задавалась при проектировании. Поэтому дистанция r_{\min} может составлять довольно значительную величину. В итоге наиболее простым решением, обеспечивающим возможность локации целей на малых дистанциях, является введение ступенчатой или плавной регулировки величины излучаемой мощности.

§ 8.5. Коэффициент усиления приемного тракта

В аналоговой технике первых поколений РПА коэффициент усиления приемного тракта был одним из основных параметров. Он показывал, во сколько раз величина напряжения эхосигнала на выходах усилителей индикаторов и регистраторов превышает соответствующее напряжение на входе предварительного усилителя. В зависимости от типа индикатора или регистратора величина этого параметра изменяется в значительных пределах. Так, например, в гидролокаторе «Прибой-101» коэффициент усиления сигналов, поступающих на регистратор, составляет $K_y = 60 \cdot 10^6$, на электронный индикатор — $K_y = 30 \cdot 10^6$, на телефоны — $K_y = 1 \cdot 10^6$.

В современной РПА приемный тракт состоит из совокупности устройств аналоговой и цифровой техники. В этом случае на оконечные устройства РПА сигналы поступают в виде цифровых кодов, поэтому коэффициенты усиления следует рассчитывать отдельно для предварительных усилителей и аналоговых усилителей устройств отображения информации.

Коэффициент усиления предварительного усилителя определяется отношением минимального допустимого сигнала $U_{\min \text{ АЦП}}$ на входе аналого-цифрового преобразователя (АЦП) к минимальному сигналу $U_{\text{вх. min}}$ на входе предварительного усилителя

$$K_y = U_{\min \text{ АЦП}} / U_{\text{вх. min}} \quad (8.21)$$

Величина $U_{\text{вх. min}}$ определяется выражением (8.17). Значение $U_{\min \text{ АЦП}}$ зависит от динамического диапазона и максимально допустимого входного напряжения АЦП $U_{\max \text{ АЦП}}$. Согласно [58] для $(b+1)$ -разрядного (включая знаковый разряд) АЦП отношение максимального сигнала к шуму квантования определяется следующим соотношением:

$$D (\text{дБ}) \approx 6b - 1. \quad (8.22)$$

С учетом необходимости превышения полезного сигнала над уровнем шумов квантования на N децибел динамический диапазон АЦП для полезных сигналов составляет

$$D (\text{дБ}) = 6b - (N + 1). \quad (8.23)$$

В зависимости от требуемой точности преобразования малых сигналов в цифровой код величина N может принимать значения от 3 до 20 дБ. Используя выражения (8.21) и (8.23), можно показать, что

$$K_y = U_{\max \text{ АЦП}} / U_{\text{вх. min}} 10^{0,05 (6b - N - 1)}. \quad (8.24)$$

Выражение (8.24) характеризует максимальный коэффициент усиления, необходимый при обнаружении целей на максимальных дистанциях. Вследствие ограниченного динамического диапазона устройств отображения информации эхосигналы от целей, находящихся на малых дистанциях от судна, превышают при такой величине K_y максимальное значение входных сигналов этих устройств, что не позволяет классифицировать величину близко расположенных целей. В связи с этим для обеспечения работы на средних и малых дистанциях вводится ручной регулятор усиления, позволяющий плавно или дискретно уменьшать величину K_y .

В некоторых рыбопоисковых приборах целесообразно сохранить аналоговую обработку эхосигналов вплоть до детектора, за которым следует АЦП. В этом случае в приведенных выше рассуждениях величина K_y определяет коэффициент усиления всего приемного тракта от входа предварительного усилителя до детектора.

§ 8.6. Автоматическая регулировка усиления

Амплитуда отраженных от объекта эхосигналов уменьшается при увеличении расстояния и зависит от типа и волнового размера объекта, а также от акустических свойств среды. Так, для сферы

с размерами значительно меньшими длины волны амплитуда звукового давления эхосигнала на поверхности антенны описывается следующим выражением (при нахождении сферы в дальнем поле) [47]:

$$p(r) = (W_{a\gamma n} R_{\text{эо}}^2 / 8\pi r^4)^{1/2} 10^{-0,1\beta r}. \quad (8.25)$$

Зависимость указанной амплитуды звукового давления от времени, прошедшего с момента начала излучения (учитывая, что $r = ct/2$), можно записать в следующем виде

$$p(t) = (2W_{a\gamma n} R_{\text{эо}}^2 / \pi c^3 t^4)^{1/2} \cdot 10^{-0,05\beta ct}. \quad (8.26)$$

Соответствующие выражения для эхосигналов при отражении от идеальной бесконечной плоскости имеют вид

$$p(r) = (W_{a\gamma n} \rho c / 8\pi r^2)^{1/2} \cdot 10^{-0,1\beta r} \text{ и } p(t) = (W_{a\gamma n} \rho / 2\pi c t^2)^{1/2} \cdot 10^{-0,05\beta ct}. \quad (8.27)$$

Чаще всего считают [47], что эхосигналы от одиночных рыб описываются соотношениями (8.25) и (8.26), эхосигналы от плотных и протяженных рыбных скоплений — выражениями (8.27). Приведенные закономерности изменения амплитуды эхосигналов используются при построении устройств динамической регулировки усиления РПА.

Для классификации и определения размеров рыбы и рыбных скоплений необходимо, чтобы электрические сигналы в приемном тракте, соответствующие эхосигналам от одной и той же цели на разных дистанциях, при поступлении на индикаторы и регистраторы оставались постоянными по амплитуде. При неизменных параметрах водной среды, отражающей способности цели, и характеристиках тракта излучения условие постоянства величины напряжения $U_{\text{вых}}$ на выходе приемного тракта можно записать в следующем виде

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{вх}}(r, t) K_{y.n} K_y(r, t) = \text{const}, \quad (8.28)$$

где $U_{\text{вх}}(r, t)$ — амплитуда напряжения на входе приемного тракта; $K_{y.n}$ — коэффициент усиления нерегулируемых каскадов приемного тракта (он соответствует коэффициенту усиления приемного тракта в начале цикла приема); $K_y(r, t)$ — изменяемый с течением времени коэффициент усиления регулируемых каскадов приемного тракта. Так как $U_{\text{вх}}(r, t) = \nu p(r, t)$ и $K_{y.n} = U_{\text{вых}} / \nu p_n$, где $p(r, t)$ — зависимость звукового давления эхосигнала от расстояния до цели и времени, прошедшего с момента начала излучения, а p_n — амплитуда звукового давления эхосигнала в начале цикла приема, выражение для $K_y(r, t)$ можно записать в следующем виде:

$$K_y(r, t) = p_n / p(r, t). \quad (8.29)$$

Таким образом, с учетом выражений (8.25), (8.26) и (8.29) коэффициент усиления приемного тракта при приеме эхосигналов от одиночных рыб должен изменяться по следующим законам

$$K_y(r) = (r/r_n)^2 \cdot 10^{0,1\beta(r-r_n)} \text{ и } K_y(t) = (t/t_n)^2 \cdot 10^{0,05\beta c(t-t_n)}, \quad (8.30)$$

где r_n и t_n — значения дистанции и времени, соответствующие началу действия регулировки. При измерении коэффициента усиления в децибелах эти выражения записываются в следующем виде

$$K_y(r) = 40 \lg(r/r_n) + 2\beta(r - r_n) \text{ и } K_y(t) = 40 \lg(t/t_n) + \beta c(t - t_n). \quad (8.31)$$

Соответственно при приеме эхосигналов от протяженных рыбных скоплений с учетом выражений (8.27) и (8.29) получаются следующие закономерности для изменения коэффициента усиления приемного тракта:

$$K_y(r) = (r/r_n) \cdot 10^{0,1\beta(r-r_n)} \text{ и } K_y(t) = (t/t_n) \cdot 10^{0,05\beta c(t-t_n)} \quad (8.32)$$

или в децибельной форме

$$K_y(r) = 20 \lg(r/r_n) + 2\beta(r - r_n) \text{ и } K_y(t) = 20 \lg(t/t_n) + \beta c(t - t_n). \quad (8.33)$$

Процедура автоматической компенсации уменьшения амплитуды сигнала при увеличении расстояния до цели посредством пропорционального увеличения коэффициента усиления приемного тракта называется временной автоматической регулировкой усиления (ВАРУ). В приемно-усилительных трактах РПА, (например, в рыбопоисковых комплексах «Прибой-101», «Сарган-К», эхолотах ЕТ100, ЕК400, FQ-50, гидролокаторах FSS-32В, FSS-75В и др.) часто используются одновременно оба рассмотренных закона изменения ВАРУ, что позволяет в зависимости от поисковых условий выбирать наиболее оптимальный вариант работы РПА.

Приведенные на рис. 8.3 обобщенные графические зависимости иллюстрируют принцип действия ВАРУ. Так как средний уровень объемной реверберации изменяется пропорционально $1/r$ [34, 96], применение ВАРУ с законами изменения (8.32) и (8.33) позволяет значительно уменьшить на выходе приемного тракта динамический диапазон реверберационной помехи и в результате обеспечить при индикации и регистрации превышение амплитудных значений эхосигналов над средним уровнем реверберации.

В некоторых случаях применяется ВАРУ, обеспечивающая стационаризацию реверберационной помехи путем изменения коэффициента усиления по закону

$$K_y(r) = 30 \lg(r/r_n) + 2\beta(r - r_n). \quad (8.34)$$

Такой закон ВАРУ близок к закону изменения среднего уровня поверхностной реверберации, изменяющегося пропорционально $1/r$

[96], и может использоваться в РПА с преобладанием горизонтального или близкого к нему режима лоцирования. Рассматриваемый закон является промежуточным для двух приведенных ранее и, по-видимому, может служить приближением для компенсации закона изменения звукового давления эхосигналов, принимаемых от средних по размеру и плотности промышленных объектов. Примером использования рассмотренного закона ВАРУ служит приемный тракт гидролокатора SM600 фирмы Simrad.

Стационаризация реверберационной помехи с помощью ВАРУ помимо улучшения обнаружения полезных сигналов на фоне по-

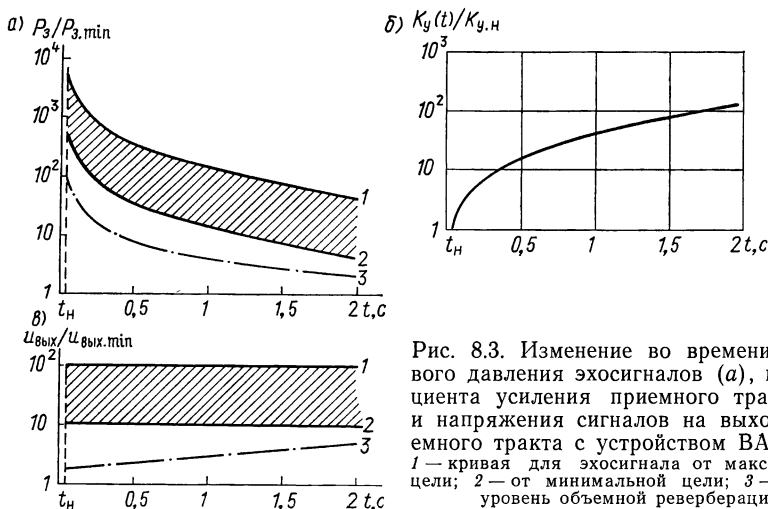


Рис. 8.3. Изменение во времени звукового давления эхосигналов (а), коэффициента усиления приемного тракта (б) и напряжения сигналов на выходе приемного тракта с устройством ВАРУ (в). 1 — кривая для эхосигнала от максимальной цели; 2 — от минимальной цели; 3 — средний уровень объемной реверберации.

мех позволяет ввести пороговые устройства для отсечки реверберационной помехи, что повышает качество отображения информации на индикаторах и регистраторах.

Значения r_n и t_n не являются строго определенными, но от их выбора зависит требуемая глубина ВАРУ. Так, например, при $r_n=1$ м, $\beta=3$ дБ/км и изменении расстояния лоцирования r от 1 до 1000 м величина $K_y(r)$ для закона (8.33) должна изменяться от 0 до 66 дБ. Такие величины изменения K_y легко реализуются. При необходимости использования ВАРУ до дистанции 4000 м требуемая глубина ВАРУ возрастает при $r_n=1$ м до 96 дБ, что очень сложно выполнить в реальной конструкции. Увеличение значения r_n до 20 м уменьшает диапазон изменения $K_y(r)$ до приемлемой величины 70 дБ. Приведенный пример показывает, что для РПА с большой дальностью действия желательнее вводить в устройства ВАРУ минимум два значения r_n соответственно для коротких и длинных поисковых диапазонов. Такие устройства ВАРУ используются, например, в гидролокаторах «Таймень» и SM600.

В ближнем поле и переходной зоне антенны распределение чувствительности имеет сложный характер (см. рис. 7.1) и не соот-

ветствует выражениям (8.25), (8.26) и (8.27). Для компенсации этой особенности в некоторых рыбопоисковых приборах вводится дополнительная, регулируемая в небольших пределах по глубине и знаку ВАРУ, действующая на относительно коротком участке в начале режима приема. Такая регулировка введена, например, на входе усилителя самописца эхолота ЕК-S фирмы «Simrad», предназначенного для установки на научно-исследовательских судах.

Известно, что уровень реверберации зависит не только от времени, прошедшего с момента начала излучения, но и от некоторых параметров РПА и водной среды [96]. Так как параметры водной среды на пути распространения акустических колебаний не остаются постоянными даже при неизменной ориентации ДН, действительный уровень реверберации может колебаться в широких пределах относительно предполагаемого среднего уровня. При сканировании приемной ДН возникают дополнительные отличия в законах изменения уровня реверберационной помехи для различных направлений зондирования. Все это приводит к расширению динамического диапазона реверберационной помехи на выходе приемного тракта, что снижает эффективность действия ВАРУ и пороговых устройств и сужает полезный динамический диапазон последующих трактов РПА. В современной РПА, использующей дискретную технику при обработке эхосигналов, для корректировки отклонений уровня реверберационной помехи от среднего уровня используется автоматическая регулировка усиления (АРУ). С ее помощью обеспечивается поддержание на входе цифровых трактов постоянной мощности реверберационной помехи [58]. В многоканальной РПА, например, в гидролокаторах SM600 и SX200 в каждый канал приемного тракта вводятся независимые друг от друга устройства АРУ. Для устранения колебаний амплитуды эхосигналов от целей одного и того же размера, вызываемых действием АРУ, при подаче сигналов на оконечные устройства индикаторов и регистраторов должно осуществляться восстановление исходных величин сигналов посредством обратной компенсации действия АРУ [58].

Использование ВАРУ и АРУ позволяет кроме повышения классификационных возможностей РПА снизить требования к диапазону входных сигналов АЦП, уменьшить разрядность устройств цифровой обработки сигналов, согласовать динамический диапазон входных эхосигналов с динамическим диапазоном устройств отображения информации.

§ 8.7. Полоса пропускания

Для выделения полезных сигналов на фоне шумов приемные тракты РПА должны обладать определенной частотной избирательностью. Основную избирательность в аналоговых приемных трактах обычно обеспечивают фильтры сосредоточенной селекции. В цифровых приемных трактах эта задача решается с помощью

полосовых цифровых фильтров. Используемые в РПА гидроакустические антенны обычно достаточно широкополосны и мало влияют на общую полосу пропускания приемного тракта. Для достижения требуемой избирательности по побочным каналам приема при использовании принципа супергетеродинного приема в аналоговых приемных трактах или для подавления частотных составляющих, возникающих в результате наложения частот при дискретизации сигналов в цифровых трактах обработки сигналов, необходимо обеспечить предварительную частотную фильтрацию в каскадах, предшествующих устройствам частотного преобразования или АЦП соответственно. С этой целью в состав предварительных усилителей включают полосовые фильтры (в большинстве случаев один или два каскада с резонансными контурами), которые с целью обеспечения стабильности общей частотной характеристики приемного тракта, а также и фазовых характеристик в многоканальной РПА, выполняются достаточно широкополосными по сравнению с требуемой полосой пропускания тракта.

При необходимости учета влияния избирательных свойств АС и предварительных усилителей (например, в случае использования коротких зондирующих импульсов) частотная характеристика всего приемного тракта определяется как произведение соответствующих парциальных частотных характеристик.

Максимизация пикового отношения сигнал/шум достигается при использовании в приемном тракте согласованного фильтра, частотная характеристика которого является функцией, комплексно-сопряженной со спектром входного сигнала [94]. Так как форма входных сигналов в локационных устройствах и характеристики шумов зависят от многочисленных факторов, суммарное влияние которых учесть невозможно, техническая реализация согласованного фильтра практически не достижима. В связи с этим в приемниках импульсных сигналов используются так называемые квазиоптимальные фильтры, представляющие собой обычные линейные фильтры, значение полосы пропускания которых согласовано с длительностью и формой принимаемых импульсов. Значение полосы зависит также и от формы амплитудно-частотной характеристики самого фильтра. Так например, для тональных входных радиоимпульсов длительностью τ с прямоугольной огибающей и фильтра в виде одиночного резонансного контура максимальное отношение сигнал/шум достигается при $\Delta f = 0,4/\tau$, где Δf — ширина полосы фильтра на уровне минус 3 дБ. При использовании фильтра с гауссовской резонансной кривой эта величина составляет $\Delta f = 0,72/\tau$, а для фильтра с идеально-прямоугольной амплитудно-частотной характеристикой $\Delta f = 1,37/\tau$. Для фильтров других типов и при других формах огибающих радиоимпульсов оптимальная величина Δf может принимать значения от $0,61/\tau$ до $0,72/\tau$ [94].

В приемно-усилительных трактах РПА обычно используются фильтры с полосой пропускания большей оптимальной вследствие необходимости учета эффекта Доплера и нестабильности наст-

ройки аппаратуры. Выражение для требуемой полосы пропускания приемного тракта в общем случае записывается в следующем виде:

$$\Delta f = \Delta f_c + \Delta f_{д.ц} + \Delta f_{д.с} + \Delta f_{н.г} + \Delta f_{н.п}, \quad (8.35)$$

где Δf_c — ширина спектра эхосигнала; $\Delta f_{д.ц}$ и $\Delta f_{д.с}$ — смещение центральной частоты спектра эхосигнала вследствие движения цели и судна соответственно; $\Delta f_{н.г}$ и $\Delta f_{н.п}$ — отклонение частот настройки генераторных устройств и приемного тракта от рабочей частоты РПА вследствие влияния дестабилизирующих факторов.

Известно, что ширина спектра одиночного импульсного радиосигнала бесконечна, однако при технической реализации приемно-усилительного тракта величину Δf_c принимают равной определенной конечной величине, при которой обеспечивается сохранение по возможности большей части энергии импульса. По-видимому в качестве такой величины можно принимать в каждом конкретном случае рассмотренные выше значения Δf для квазиоптимальных фильтров. При ориентировочных расчетах параметров РПА для тональных радиоимпульсов обычно принимают $\Delta f_c = 1/\tau$ [34, 47].

Исходя из приведенного ранее выражения (7.23), описывающего влияние эффекта Доплера на изменение частоты эхосигнала, для $\Delta f_{д.с}$ и $\Delta f_{д.ц}$ с учетом как знака, так и максимально возможных величин доплеровских смещений частоты можно записать

$$\Delta f_{д.ц} = 4fv_c/c \text{ и } \Delta f_{д.с} = 4fv_k/c. \quad (8.36)$$

Полученные выражения используются при проектировании гидролокаторов, так как в этом случае влияние эффекта Доплера максимально вследствие широкого диапазона изменения углов наведения АС на цель.

В эхолотах влияние эффекта Доплера, возникающего в результате собственного движения судна в горизонтальной плоскости, на полосу пропускания становится ощутимым при широких ДН и больших углах качки. Величина смещения частоты эхосигнала будет максимальна для крайних лучей основного лепестка ДН и определяется следующим выражением:

$$\Delta f_{д.с} = [4fv_c \sin(\theta_{0,7} + \varphi_k)]/c, \quad (8.37)$$

где φ_k — максимальный угол килевой качки.

Вертикальные перемещения судна также вызывают изменение частоты заполнения принимаемых эхосигналов. В этом случае можно использовать формулу $\Delta f_{д.с} = 4fv_c/c$. Следует отметить, что определение скорости вертикальных перемещений судна является довольно сложной задачей. С приемлемой точностью эту величину можно определить для судна малого размера. В этом случае под воздействием колебаний поверхности воды, которые можно считать с некоторыми допущениями гармоническими, судно совершает вынужденные колебания подобно маятнику. Известно, что максимальная скорость v_{\max} , которой обладает маятник при прохождении

точки равновесия, определяется как $v_{\max} = 2\pi A/T$, где A — амплитуда отклонения колеблющегося тела от положения равновесия, а T — период колебаний. Считая высоту морской волны равной $2A$ и зная период волны, можно оценить максимальную скорость вертикального перемещения судна и соответствующее ему доплеровское смещение частоты.

Влияние величин $\Delta f_{\text{н.г}}$ и $\Delta f_{\text{н.п}}$ на общую полосу пропускания при использовании в аппаратуре современной элементной базы незначительно. Применение же кварцевых задающих генераторов (в тракте излучения) и кварцевых генераторов тактовых частот (в цифровых приемных трактах) при обеспечении точного сопряжения частот настройки приемного и генераторного трактов позволяет вследствие высокой стабильности параметров этих устройств вообще не учитывать эти величины в выражении (8.35).

Следует заметить, что иногда в РПА полосу пропускания приемного тракта специально выбирают шире оптимальной. В этом случае уменьшается время спадания заднего фронта принимаемого радиоимпульса, что улучшает разрешающую способность по дистанции и, в частности, позволяет уменьшить мертвую зону [34, 89].

В качестве примера приведем сравнительные расчеты полос пропускания частот приемных трактов гидролокатора и эхолота при следующих одинаковых исходных данных: $f=20$ кГц; $\tau=5$ мс; $v_c=15$ уз (7,72 м/с); $v_k=4$ уз (2,06 м/с); $\theta_{0,7}=14^\circ$; $\varphi_k=7^\circ$; $c=1500$ м/с. При использовании в аппаратуре кварцевых резонаторов требуемая полоса пропускания частот гидролокатора составляет

$$\Delta f = \frac{1}{\tau} + \frac{4fv_c}{c} + \frac{4fv_k}{c} = \frac{1}{5 \cdot 10^{-3}} + \frac{4 \cdot 20 \cdot 10^3 \cdot 7,72}{1500} + \\ + \frac{4 \cdot 20 \cdot 10^3 \cdot 2,06}{1500} = 200 + 412 + 110 = 722 \text{ Гц.}$$

Аппаратурная компенсация доплеровского смещения частоты, обусловленного движением судна, позволяет резко уменьшить требуемую полосу частот. В этом случае

$$\Delta f = \frac{1}{\tau} + \frac{4fv_k}{c} = \frac{1}{5 \cdot 10^{-3}} + \frac{4 \cdot 20 \cdot 10^3 \cdot 2,06}{1500} = 200 + 110 = 310 \text{ Гц.}$$

Вследствие малых скоростей перемещения рыбных объектов по вертикали членом $\Delta f_{\text{д.п}}$ в выражении (8.35) для эхолота можно пренебречь. Согласно выражению (8.37) доплеровское смещение частоты в эхолоте может достигать

$$\Delta f_{\text{д.с}} = \frac{4fv_c \sin(\theta_{0,7} + \varphi_k)}{c} = \frac{4 \cdot 20 \cdot 10^3 \sin(7^\circ + 7^\circ) \cdot 7,72}{1500} = 100 \text{ Гц.}$$

Вертикальное перемещение судна при волнении моря 5 баллов ($2A=3,5$ м; $T=7$ с) может вызвать (ориентировочно) следующий доплеровский сдвиг частоты:

$$\Delta f_{\text{д.с}} = \frac{4\pi f \cdot 2A}{cT} = \frac{24 \cdot 3,14 \cdot 20 \cdot 10^3 \cdot 3,5}{1500 \cdot 7} = 84 \text{ Гц.}$$

Так как оба источника доплеровского смещения частоты независимы, принимаем максимальное значение, т. е. $\Delta f_{д.с} = 100$ Гц. Таким образом, требуемая полоса пропускания частот эхолота составляет

$$\Delta f = \Delta f_c + \Delta f_{д.с} = 200 + 100 = 300 \text{ Гц.}$$

Приведенный пример показывает, что в эхолотах параметры фильтра могут быть взяты достаточно близкими к оптимальным, а в гидролокаторе такое приближение может быть достигнуто только при обеспечении компенсации эффекта Доплера, вызываемого движением судна.

Глава 9

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ СТАБИЛИЗАЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИК НАПРАВЛЕННОСТИ АНТЕНН ОТ КАЧКИ СУДНА

§ 9.1. Минимально допустимая ширина диаграмм направленности антенн без стабилизации их в пространстве при качке судна

В связи с постепенным обеднением добываемых биологических запасов Мирового океана и выходом рыболовного промысла в открытые районы океана с большими глубинами в последнее время требования к РПА резко изменяются. Задачи, стоящие перед промысловым флотом, непрерывно расширяются и усложняются. Современные технические средства поиска рыбы и контроля орудий лова на сегодняшний день еще не полностью обеспечивают решение всех этих задач, большинство из которых требуют значительного сужения ДН акустических антенн, повышения коэффициента концентрации энергии, увеличения разрешающей способности, повышения достоверности получаемой информации, качественной и количественной оценки запасов промысла, изучения поведения объектов промысла и т. п.

Обострение ДН антенн без стабилизации их в пространстве при качке судна допустимо до определенного предела, обусловленного скоростью, а также периодом и углами качки судна, на котором эксплуатируется РПА [64].

Минимально допустимая ширина ДН антенны 2θ в интересующей проектанта плоскости в зависимости от дальности действия r , м, угла качки судна β , град, периода качки T , с, и принимаемого в расчетах для РПА условия перекрытия половины ДН (прямоугольник, круг, эллипс) в плоскости, перпендикулярной распространению акустических волн, определяется выражением

$$2\theta = 10^{-2} \beta r / T \cos \beta. \quad (9.1)$$

Промысловое судно при волнении моря испытывает бортовую и килевую качку. Период колебаний для бортовой качки определяется формулой [41]

$$T_6 = \alpha B / h^{1/2}, \quad (9.2)$$

где α — инерционный коэффициент судна ($\alpha = 0,6 \div 0,8$); B — ширина судна, м; h — начальная метacentрическая высота, м. Период бортовой качки определяется классом судна и лежит в пределах $5 \div 12$ с. Период колебаний для килевой качки

$$T_k = 2,4H^{1/2}, \quad (9.3)$$

где H — осадка судна, м. Практически при расчетах принимают амплитуду бортовой качки не более 22° , килевой — не более $8-10^\circ$. Так, например, для гидролокатора с $r_{\max} = 3000$ м, установленного на судне, у которого $T_6 = 12$ с, $\beta_{B \max} = 20^\circ$, $\beta_{k \max} = 10^\circ$ и $H = 4$ м, необходимая ДН при ее направлении по траверзу к судну будет равна 50° , а при направлении по носу судна — 25° . Как ясно из примера, данный гидролокатор не может решать задачи определения угловых координат рыбных объектов, если не принять специальные меры по стабилизации ДН. Если в том же примере задаться минимальным углом $2\theta \leq 10^\circ$, что реально на практике, то угол бортовой качки не должен превышать 1° .

Поиск и обнаружение рыбы при глубоководном лове с использованием узких ДН антенн имеет ряд особенностей и предъявляет определенные требования к РПА. Рассмотрим их отдельно применительно к эхолотам и гидролокаторам.

§ 9.2. Особенности поиска рыбы эхолотом

При регистрации разреженных скоплений придонной рыбы имеется ряд факторов, влияющих на достоверность получаемой информации. В первую очередь это касается разрешающей способности приборов.

Практика эксплуатации эхолотов с широкой ДН показывает, что разреженные скопления придонной рыбы фиксируются неверно или вообще не регистрируются на приборах индикаций [39]. Протяженность фронта излучаемого импульса растет с увеличением расстояния (глубины) при неизменной ширине ДН антенны, т. е. с увеличением глубины площадь просматриваемой поверхности дна увеличивается.

При наличии ровной отражающей поверхности (дна) и отсутствии качки судна фиксируется только эхосигнал от центральной части луча, эхосигналы же от боковых частей конусного луча отражаются в сторону и вследствие этого не попадают на приемник. При неровной поверхности дна на приемник попадают и эхосигналы от боковых частей луча. За счет разности хода лучей эхосигнал от боковых частей луча запаздывает, и запись отметки дна получается шире, в результате чего наблюдается боковое эхо

(донная реверберация). При движении судна на эхограммах неровности дна сглаживаются, а форма косяков рыбы искажается. Это объясняется тем, что запись начинается в тот момент, когда передняя граница ДН попадает на косяк, хотя фактически он находится на некотором расстоянии впереди по курсу судна. Запись продолжается до тех пор, пока косяк не выйдет из зоны задней границы ДН, т. е. когда судно уже будет впереди на некотором расстоянии от косяка. Эхограмма горизонтальной протяженности косяка в этом случае не соответствует его действительной величине [4]. С увеличением глубины ошибка записи растет; кроме того, она зависит от ширины ДН. Боковые лепестки ДН вносят дополнительные искажения.

В современных эхолотах для обнаружения рыбы на больших глубинах решается задача регистрации одиночной рыбы на расстоянии 1—2 м от грунта, для этого необходимо обеспечить высокую разрешающую способность. Разрешающей способностью эхолота по глубине (или по лучу) называется его способность регистрировать отдельно на приборах индикации два объекта, расположенных по вертикали (по лучу) на минимально допустимых различных глубинах. Чтобы регистрировать рыбу, находящуюся на расстоянии 1—2 м от грунта, в эхолотах применяются устройства «Белая линия», «Контурная линия», «Система дно», «Стробирование» и другие, в большинстве которых используется явление значительного превышения (на порядок) интенсивности эхосигнала, отраженного от дна, по сравнению с интенсивностью эхосигнала, отраженного от рыбы.

При широкой же ДН рыба, находящаяся на краю луча и на глубине меньшей, чем рыба, находящаяся вертикально под судном, на приборах индикации эхолота будет показана примерно на одной и той же глубине (рис. 9.1, рыбы 1 и 2). Рыба же 3 вообще не будет обнаружена, так как эхосигналы от нее маскируются эхосигналами от грунта, приходящими по направлениям, близким к оси ДН. При неровном дне и на свалах глубин также происходит маскирование эхосигналов от придонной рыбы, но уже большей частью ширины ДН, а зачастую полностью всей шириной. Рыба 4 на рис. 9.1, б зарегистрирована не будет, так как правый боковой луч за счет наклона дна даст эхосигнал, который начнет записываться раньше, чем эхосигналы от рыб, находящихся на большей глубине. Рыба 5 будет неправильно зарегистрирована по глубине. Еще больше усугубляется ситуация в эхолотах при наличии качки судна. Таким образом, регистрация отдельных рыб широкой ДН на больших глубинах практически невозможна из-за наличия донной реверберации и искажений формы и места положения объектов локации.

Для повышения достоверности данных о нахождении придонной рыбы необходимо уменьшить толщину непросматриваемого слоя B (рис. 9.1, а), зависящего от ширины диаграммы направленности 2θ и глубины H . Эта толщина определяется выражением

$$B = H (1 - \cos^2 \theta / 2). \quad (9.4)$$

Отсюда максимально допустимое значение угла $2\theta_q$ определяется

$$2\theta_q = 2 \arccos(1 - B/H). \quad (9.5)$$

Для обнаружения одиночной рыбы в слое B , равном 1—2 м, на глубинах 1000—1500 м раствор ДН не должен превышать 5—7°. Но сужение ДН антенн допустимо лишь до определенных пределов, обусловленных параметрами качки судна и его скоростью, а также массогабаритными характеристиками РПА.

Наиболее негативное влияние при поиске рыбы оказывает качка судна на работу антенны с узкой ДН. При качке судна ось

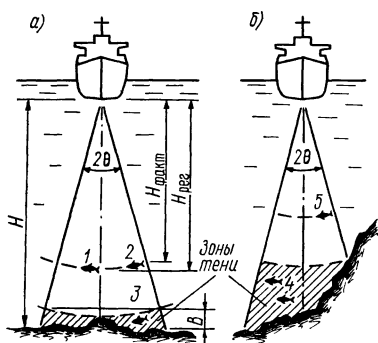


Рис. 9.1. Поиск рыбы эхолотом с широкой ДН без учета качки судна: а — на ровном грунте; б — на свале.

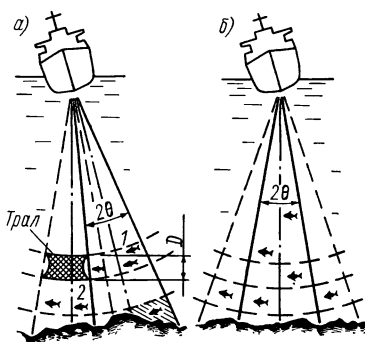


Рис. 9.2. Поиск рыбы эхолотом с узкой ДН при качке судна: а — без стабилизации ДН; б — стабилизированной ДН.

ДН отклоняется от вертикали, охватывая участок, который не может быть обловлен тралом (см. рис. 9.2, а, рыба 1), в результате чего искажается информация об обстановке непосредственно под судном. При этом рыба 2, находящаяся на небольшом расстоянии от вертикали, проведенной через судно, не будет обнаружена, даже если она охватывается полем излучения антенны, так как наличие дополнительных боковых лепестков ДН при вертикальном направлении их по кратчайшему расстоянию H вызывает появление сильных эхосигналов от грунта, интенсивность которых может превышать интенсивность эхосигналов от рыб, несмотря на то, что мощность излучения в пределах дополнительных боковых лепестков значительно меньше. Кроме того, возникает ошибка в определении глубины под килем судна и глубины нахождения рыбы.

Таким образом, при наличии качки судна эхолоты с нестабилизированной узкой ДН не имеют особых преимуществ перед приборами, имеющими широкую ДН, за исключением увеличения дальности действия прибора при одной и той же энергетике. Положительные качества эхолотов с узкой ДН особенно полно проявляются при их стабилизации в плоскости горизонта, когда исключается влияние качки судна на его работу. В этом случае рыба, находящаяся в зоне ДН (рис. 9.2, б), будет четко и надежно

фиксироваться на действительной глубине ее нахождения, а ДН постоянно охватывать зону вероятного облова. В связи с этим для поиска рыбы на больших глубинах эхолотами с узкой ДН ее стабилизация обязательна.

Изложенные рассуждения справедливы также и при поиске рыбы на небольших глубинах, на которых, как правило, используются малые и средние суда, в большей степени подверженные качке, чем крупные [29]. Возникающие при этом интенсивные поверхностная и донная реверберации практически делают непригодными обычные гидроакустические поисковые приборы. Только использование на таких судах в составе РПА компактных недорогих систем стабилизации позволит устранить негативное воздействие качки судна на поиск рыбы.

§ 9.3. Обнаружение объекта поиска гидролокатором при качке судна

Для рыбопоисковых гидролокаторов качка судна при отсутствии стабилизации антенны не только ухудшает дискретность обновления информации о координатах объекта, за которым ведется слежение, но влияет также и на величину ошибок единичных измерений [39]. Смещения ДН в пространстве, вызванные качкой судна, приводят к появлению дополнительных ошибок единичных измерений координат. При использовании гидролокаторов одновременного секторного обзора с узкими ДН наблюдается ложный переход эхосигналов из одного канала в другой.

Стабилизация акустического луча гидролокатора решает задачу повышения вероятности P обнаружения объекта за один цикл обзора и удержания его в определенной ДН в течение нескольких циклов обзора при слежении за ним. Основным требованием, предъявляемым к системе стабилизации ДН антенны гидролокаторов, является обеспечение заданной вероятности обнаружения объекта, а также удержания его в определенном канале (в случае многоканальной системы) при качке судна.

Определению вероятности удержания объекта в отдельном канале должно предшествовать обнаружение объекта, т. е. попадание его в данный сектор обзора. При воздействии качки на антенну гидролокатора его ДН даже при отсутствии относительного движения судна и объекта колеблется относительно заданного направления. Если отношение сигнал/шум настолько велико, что поступающий на вход приемного тракта эхосигнал обнаруживается практически достоверно ($P=1$), то необходимым условием обнаружения объекта в условиях качки является наведение приемной ДН на объект в момент приема эхосигналов. Однако это условие не является достаточным. Вследствие того, что интервал времени между излучением сигнала и приемом эхосигнала в современных рыбопоисковых гидролокаторах соизмерим с периодом качки, а иногда и превосходит его, излучение сигнала и прием эхосигнала

происходят в общем случае при различных положениях ДН в пространстве.

Направление ДН в определенный момент времени является функцией отреализовавшихся в этот момент мгновенных значений бортовой (θ) и килевой (ψ) качек. Процессы качки судна $\theta(t)$ и $\psi(t)$ представляют собой случайные функции. В большинстве случаев на практике эти функции считаются стационарными случайными процессами. Экспериментально и теоретически установлено, что взаимная связь процессов бортовой и килевой качек судна незначительна, и в расчетах, связанных с оценкой влияния качки на эффективность пространственного наблюдения, ее можно не учитывать [39].

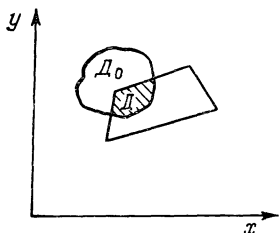


Рис. 9.3. К пояснению вероятности попадания качающейся ДН гидролокатора в область пеленгуемого объекта.

В силу случайного характера процессов качки $\theta(t)$ и $\psi(t)$ мгновенное направление ДН является также случайной величиной. Обнаружение объекта состоит, если: а) объект был обнаружен (случайное событие А); б) ДН в момент прихода эхосигнала была наведена на объект (случайное событие Б).

Вероятность совмещения двух случайных событий равна произведению вероятности одного из них на условную вероятность другого:

$$P\{A \text{ и } B\} = P\{A\}P\{B/A\}, \quad (9.6)$$

где $P\{A \text{ и } B\}$ — вероятность обнаружения объекта; $P\{A\}$ — вероятность облучения объекта; $P\{B/A\}$ — вероятность попадания эхосигналов на вход приемного тракта.

Вероятность удержания объекта в отдельном канале должна определяться для нескольких циклов обзора при условии, что обнаружение его при каждом цикле обзора — событие практически достоверное. В этом случае задача сводится к определению вероятности попадания эхосигнала в один и тот же канал приемного тракта при условии отсутствия относительного движения судна и объекта. Для определения мгновенных вероятностей обнаружения (dP) применяется графоаналитический метод, заключающийся в аналитическом определении прямоугольных координат следов ДН на горизонтальной или вертикальной плоскостях и графического определения их площадей. При таком подходе к определению мгновенных вероятностей объект представляется (рис. 9.3) в виде непрерывно меняющейся двумерной дискретной величины в определенных координатах с равномерным распределением в некоторой конечной области D_0 . Для такой величины вероятность попадания в любую область D , лежащую внутри D_0 , пропорциональна площади S_d в этой области. При этом $dP_{xy} = \lambda \, dx \, dy$ — для точек внутри области D_0 , а $dP_{xy} = 0$ для точек вне D_0 . Коэффи-

циент пропорциональности λ находится из условия

$$P \{(x, y) \in (D_0)\} = \lambda S_{D_0} = 1, \quad (9.7)$$

где $\in (D_0)$ — знак принадлежности к области D_0 , откуда

$$\lambda = 1/S_{D_0}. \quad (9.8)$$

Таким образом, вероятность попадания объекта в область D , лежащую внутри D_0 , равна

$$P = S_D/S_{D_0}. \quad (9.9)$$

В нашем случае область D_0 — след ДН на горизонтальной или вертикальной плоскостях при углах бортовой и килевой качек, равных нулю; область D — часть следа смещенной в результате качки ДН на горизонтальной или вертикальной плоскости, перекрывающая область D_0 .

Рыбопоисковые гидролокаторы с узкой ДН, кроме того, повышают достоверность информации при количественной оценке скоплений рыб, позволяют отмечать даже одиночные экземпляры крупных рыб в довольно плотных скоплениях, а также определять структуру скопления, выделять в нем ядро. Но для повышения вероятности обнаружения ($P \rightarrow 1$) акустический луч гидролокаторов с узкой ДН необходимо стабилизировать.

Часть II

ОСНОВНЫЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА РПА

Глава 10

АНТЕННЫЕ УСТРОЙСТВА

§ 10.1. Основные тенденции развития антенной техники современной РПА

Основным элементом гидроакустической РПА является антенна, где происходят чаще всего два независимых процесса: преобразование электрической энергии в акустическую (или наоборот) и формирование направленного излучения. Основой любой антенны РПА являются электроакустические преобразователи. Вопросы теории и конструирования гидроакустических антенн и преобразователей — этой обширной самостоятельной области науки и техники — весьма подробно рассмотрены в специальной научно-технической литературе [26, 27, 54, 64, 77, 79]. В данной главе кратко рассмотрены основные конструктивные особенности антенной техники РПА и тенденции ее развития.

Антенны в совокупности с защитными звукопрозрачными мембранами и обтекателями, а в некоторых необходимых случаях и с приводами управления антеннами (см. § 10.5), называют акустическими системами. Часто понятия антенны и акустические системы объединяют. Инженерные методы расчета некоторых основных параметров акустических систем произведены в гл. 7 и 8.

Антенны РПА в зависимости от назначения и исполнения можно разделить на пять групп:

- моночастотные антенны с плоской рабочей поверхностью, формирующие естественные ДН;
- двухчастотные плоские антенны, формирующие естественные ДН;
- моночастотные антенны со сканированием ДН в определенном секторе;
- моночастотные цилиндрические компенсированные антенны;
- параметрические антенны;
- сферические антенны.

Антенны первой группы, как правило, входят в состав аппаратуры шагового поиска. При этом антенны с различными размерами часто формируются из одних и тех же преобразователей (это особенно характерно для фирм Японии) т. е. уже на стадии разработки преобразователей предусматривается возможность образования размерных рядов антенн. Антенны второй группы в зарубежной аппаратуре совсем нет. В отечественной аппаратуре двух-

частотные плоские антенны успешно реализованы впервые в комплексе «Сарган» (рис. 10.1). Несмотря на относительную сложность и удорожание аппаратуры одновременного секторного и кругового обзора, разработка и изготовление антенн третьей и четвертой групп интенсивно ведется во многих странах в связи с их большой перспективностью. Параметрические антенны находятся в стадии освоения новой техники РПА (см. § 2.7, 7.8 и 11.3).

В акустических антеннах бескабельных систем контроля орудий лова, изготавливаемых только отечественной промышленностью и японскими фирмами «Fuji» и «Koden», и в ряде других малогабаритных системах широко используются дисковые пьезокерамические преобразователи, резонирующие на основной моде радиальных колебаний. Дисковые преобразователи позволяют получить необходимые для систем контроля ДН шириной $30\text{--}40^\circ$ при минимальных массах и габаритах и достаточно высокой эффективности.

В электроакустических преобразователях РПА используются магнитострикционные и пьезокерамические активные материалы. В РПА, выпускаемой западноевропейскими фирмами, наибольшее распространение нашли магнитострикторы на основе никелевых сплавов. Пьезокерамика, применявшаяся в 60-х гг. только на частотах выше 100 кГц, в настоящее время занимает доминирующее положение среди активных материалов в РПА, что продиктовано необходимостью увеличения энергетической эффективности антенн. Так, КПД никелевых антенн фирм ФРГ лежит в пределах $30\text{--}40\%$, а КПД пьезокерамических антенн последних эхолотов серии Atlas Fischfinder превышает 70% .

Антенны первого поколения отечественной РПА выполнялись на основе никелевых магнитострикционных преобразователей с поляризацией постоянным подмагничивающим напряжением. Активными элементами второго поколения отечественной РПА являлись, в основном, также магнитострикционные никелевые преобразователи, поляризация которых производилась при помощи ферритовых магнитов, вводимых в магнитную цепь преобразователя. Такие преобразователи не требуют герметизации, довольно просты в производстве, относительно дешевы и обладают высокой эксплуатационной надежностью.

Пьезокерамические преобразователи в РПА второго поколения использовались лишь в двух отечественных высокочастотных

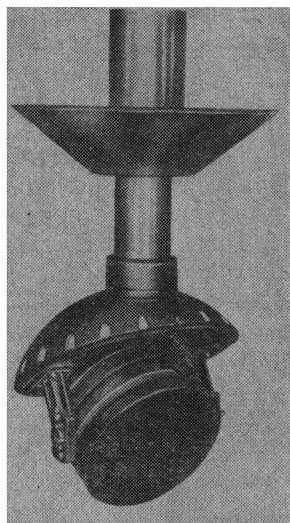


Рис. 10.1. Двухчастотная плоская антенна комплекса «Сарган».

эхолотах («Омар» — 150 кГц и «Язь» — 85 кГц), где применение никелевых преобразователей оказалось невозможным из-за малости их КПД на высоких частотах.

Анализ основных тенденций развития антенных устройств РПА уже в середине 70-х годов привел к выводу, что никелевые преобразователи не смогут обеспечить требований, предъявляемых к РПА нового поколения. Поэтому в большинстве случаев в отечественной РПА третьего поколения («Сарган», «Финвал», «Пикша», «Кумжа» и др.) и полностью четвертого поколения антенны выполняются на пьезокерамических преобразователях, позволивших улучшить тактико-технические параметры аппаратуры с одновременным сокращением ее массогабаритных данных.

Перспективными в настоящее время являются электроакустические преобразователи из магнитострикционных ферритов, широко применяемые японскими фирмами в качестве активных элементов антенн РПА на частотах до 50 кГц. Ферритовые преобразователи выгодно отличаются от никелевых практическим отсутствием потерь на токи Фуко и соответственно отсутствием необходимости в расслоении на листы толщиной 0,1—0,2 мм. Первое обстоятельство повышает КПД ферритовых преобразователей по сравнению с никелевыми, второе — позволяет значительно упростить конструкцию и технологию изготовления. КПД ферритовых антенн фирмы «Fujiipo» производства 1968 г. не превышал 40 %, производства 70-х гг. — более 60 %, при этом заметно сузилась полоса пропускания антенн (от 11 до 4 %). Несомненным достоинством ферритовых преобразователей по сравнению с пьезокерамическими является отсутствие необходимости в элементах герметизации. Промышленное освоение производства отечественных магнитострикционных ферритов практически только начинается. Поэтому в отечественной РПА они пока еще не используются.

Если антенна состоит из дискретных элементов, каждый из которых имеет свою автономную цепь питания, то такие антенны обычно называются *антенными решетками*. Фазированными сканирующими называются антенные решетки, поворот ДН которых осуществляется путем введения фазового распределения по элементам антенны.

В последнее время в РПА происходит переход от сплошных антенн к фазированным антенным решеткам. Причиной этого является в первую очередь все возрастающие требования к техническим характеристикам аппаратуры и новые возможности, появившиеся от внедрения пьезокерамических материалов при разработке элементов антенн, а также переход радиоэлектроники на новую элементную базу — элементы вычислительной техники.

Наибольшее распространение в РПА нашли антенны и многоэлементные фазированные антенные решетки следующих конструкций: плоские, цилиндрические и сферические.

§ 10.2. Плоские антенны

Плоские антенны являются наиболее распространенным типом. В зависимости от технических характеристик аппаратуры форма раскрыва плоских антенн может быть различной: квадратной, прямоугольной, ромбической и круглой, а излучающая поверхность — сплошной или набранной из дискретных преобразователей, которые в свою очередь могут иметь форму в виде круга, квадрата (или многоугольника).

Антенны и антенные решетки с прямоугольным раскрывом имеют естественный уровень боковых лепестков без учета статистических разбросов порядка 22—23 %. Величина боковых лепестков может быть уменьшена путем использования специальной формы раскрыва антенны. Так, ромбическая антенна (см. рис. 7.7) может иметь уровень боковых лепестков около 4—8 %, а антенна с круглым раскрывом до 13 %. Вопросы снижения уровня боковых лепестков за счет формы раскрыва антенны подробно рассмотрены в § 7.3.

Плоские антенны имеют наиболее простую конструкцию, позволяют осуществлять сканирование ДН в двух плоскостях до углов $\pm 45^\circ$ от нормали к плоскости антенны, самый высокий коэффициент осевой концентрации, минимальные по сравнению с двумя другими типами антенн боковые лепестки, минимальную излучающую поверхность и наименьшее количество преобразователей.

При качании луча в секторе, превосходящем по ширине ДН, происходит ее расширение, изменение формы и появление новых боковых лепестков (см. § 7.2). Эти явления проявляются особенно резко при больших углах отклонения оси ДН от нормали к решетке. Так как ширина луча меняется с изменением направления излучения, то и разрешающая способность становится функцией угла сканирования, так как она зависит от ширины ДН антенны. На практике величина сектора качания луча определяется условием отсутствия высших дифракционных максимумов, а также допустимым расширением ДН. Так, при $d = 2\lambda_0/3$ допустимый сектор качания составит $\pm 30^\circ$, так как уже начинает появляться второй максимум, а ДН при таком отклонении расширяется на 13 %; при $d = 2\lambda$ практическое отклонение оси ДН может достигать $\pm 45^\circ$.

ДН антенны при одинаковых ДН элементов определяет собой произведение множителя решетки и ДН отдельного элемента. ДН отдельного элемента также определяет возможные пределы качания луча. Идеальный элемент должен иметь ступенчатую диаграмму, равную единице в секторе качания и меньшую заданного уровня вне этого сектора. При этом подавляются все высшие дифракционные максимумы вне сектора качания. На практике обычно допускается, чтобы на краях сектора сканирования ДН имела бы уровень 0,7 по звуковому давлению (0,5 по мощности).

Одиночные элементы должны иметь размеры, допускающие их размещение на расстояниях, близких к $\lambda/2$, это необходимо для устранения высших максимумов в секторе качания.

Помимо изменения ширины ДН и ее формы при качании луча происходит и изменение коэффициента осевой концентрации решетки γ . Точное аналитическое выражение для определения γ в функции от угла сканирования имеет сложный вид. Поэтому решетку при практических расчетах заменяют сплошным раскрывом, что в принципе допустимо лишь при расстояниях между элементами $d < \lambda/2$. Для упрощения расчета пользуются следующим выражением:

$$\gamma = 4\pi ab \cos \theta / \lambda^2, \quad (10.1)$$

где a и b — размеры решетки, θ — угол сканирования.

Это выражение справедливо для значительных углов θ , т. е. $\theta \leq 1,06(\lambda/\alpha)^{1/2}$. Для малых углов расчет коэффициента концентрации следует производить по формуле

$$\gamma \approx 3\pi b (2a/\lambda)^{1/2} / \lambda \approx 13,6b (a/\lambda)^{1/2} / \lambda. \quad (10.2)$$

Необходимо отметить, что помимо изменения коэффициента осевой концентрации при качании луча происходит изменение коэффициента усиления K_y вследствие взаимного влияния элементов, который в децибельной форме определяется [96]

$$K_y = 10 \lg [(S/N)_{\text{ан}} / (S/N)_{\text{эл}}], \quad (10.3)$$

где числитель — отношение сигнал/помеха на выходе приемной антенны, а знаменатель — отношение сигнал/помеха на выходе отдельного элемента антенны, которое для простоты предполагается одинаковым на всех элементах антенны. Часто коэффициент усиления антенны называют показателем направленности. Полная подводимая мощность не зависит от угла качания, в то время как излучаемая мощность может изменяться при качании луча. Эти особенности сканирующих антенн необходимо учитывать при их проектировании.

В случае применения прямоугольной сетки в антенной решетке дифракционные максимумы высших порядков отсутствуют, когда расстояние d между излучателями в направлении координатных осей (x, y, z) удовлетворяет следующим условиям [3]:

$$\left. \begin{aligned} d_x &\leq \lambda / (\sin \theta_{x \max} + 1); \\ d_y &\leq \lambda / (\sin \theta_{y \max} + 1), \end{aligned} \right\} \quad (10.4)$$

где $\theta_{x \max}$, $\theta_{y \max}$ — максимальные углы отклонения луча в плоскостях ZX и ZY . Для случая треугольной сетки

$$d \leq 1,17\lambda^2 / (1 + \sin \theta_{\max}), \quad (10.5)$$

где θ_{\max} — максимальное отклонение луча от нормали к решетке. Например, при $\theta_{\max} = 45^\circ$ для прямоугольной и треугольной сеток

получаем $d_x = d_y = 0,58\lambda$ и $d = 0,68\lambda$. Видно, что использование треугольной сетки позволяет увеличить расстояние между излучателями и уменьшить их общее число на 13 %.

Необходимо отметить, что в случае, когда ДН элемента решетки отлична от нуля в пределах сектора сканирования и равна нулю или близка к нему вне пределов этого сектора, возможно существование дифракционных максимумов высших порядков в области действительных углов, если расстояние между излучателями больше, чем следует из (10.4) и (10.5), но при всех перемещениях луча дифракционные максимумы не должны попадать в сектор сканирования.

Выигрыш в числе излучателей для треугольной сетки по сравнению с решеткой изотропных элементов при $\theta_{\max} = 40^\circ$ в 1,8 раза. Но синтез направленного излучателя, ДН которого быстро уменьшилась бы до малых значений за пределами сектора сканирования, довольно сложен, и ДН реальных излучателей отличны от идеальной. Поэтому в реальных сканирующих антенных решетках число излучателей больше минимально возможного. Преимущество же треугольной сетки антенной решетки в смысле уменьшения числа ее каналов практического применения не находит, так как в этом случае усложняется процедура вычисления управляющих сигналов, потому что при выделении ортогональных столбцов и строк общее число управляющих сигналов вдвое больше, чем при размещении тех же элементов в узлах прямоугольной сетки.

Известно, что ДН является преобразованием Фурье от функции распределения поля в раскрыве антенны. Неравномерные амплитудные распределения по разному влияют на ширину ДН и уровень боковых лепестков. Известен целый ряд амплитудных распределений, которые позволяют получить ослабление боковых лепестков. Некоторые из них рассмотрены в § 7.3 и 8.3, они позволяют уменьшить уровень боковых лепестков антенн до 10—15 % с вероятностью 0,95. Однако дальнейшее их уменьшение ограничивается статистическими ошибками, которые появляются из-за разброса амплитудно-фазовых характеристик преобразователей. Практика показывает, что эти разбросы в серийном производстве преобразователей могут достигать ± 30 % по амплитуде и ± 30 % по фазе. Окончательный выбор амплитудного распределения и необходимого теоретического уровня ослабления боковых лепестков можно сделать только с учетом статистического анализа конкретных антенных решеток и экспериментальных исследований.

§ 10.3. Цилиндрические антенны с двумерным сканированием

Цилиндрические антенны обеспечивают круговой обзор в горизонтальной плоскости с возможностью сканирования ДН в вертикальной плоскости в пределах углов $\pm 45^\circ$ электронным способом. Сканирование ДН в горизонтальной плоскости осуществляется за счет коммутации каналов, а в вертикальной — за счет управления фазовыми задержками.

При использовании цилиндрической секционированной акустической антенны статическая ДН формируется частью цилиндрического сегмента, величина которого зависит от необходимой ее ширины в горизонтальной плоскости. Принцип сканирования ДН цилиндрической АС показан на рис. 10.2, где 1, 2, 3... — секции цилиндрической антенны; $\varphi_0, \varphi_1, \varphi_2, \dots$ — фазы возбуждающих сигналов; I, II, III — сканирующая ДН. В формировании ДН участвует группа смежных секций, база которых представляет дугу окружности. Как при излучении, так и в режиме приема с помощью ЛЗ происходит компенсация кривизны дуги этой базы.

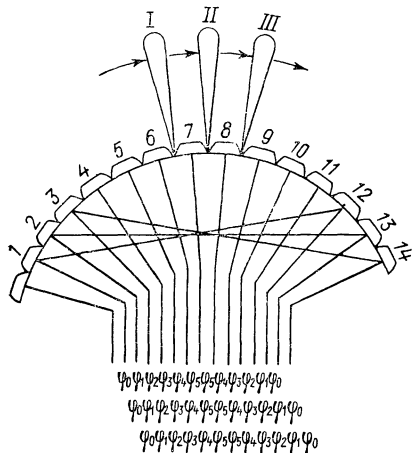


Рис. 10.2. Принцип сканирования ДН цилиндрической АС.

Электронный переключатель производит последовательное перемещение скомпенсированной базы по периметру цилиндрической антенны «с шагом» на одну секцию.

В сочетании с электронным устройством, называемым интерполятором, данные антенны в режиме приема позволяют плавно сканировать ДН в пределах одного «шага». Устройства интерполяции обеспечивают дополнительный разворот более мелкими шагами ДН между двумя соседними дискретными положениями, формируемыми при обычном сдвиге рабочего сектора АС на один шаг [65]. Операцию интерполяции осуществляют посредством

синтеза из сигналов каждой пары антенных секций, участвующих в формировании ДН, одного сигнала, являющегося эквивалентом сигнала, который можно было бы получить при механическом перемещении одной из секций из своего собственного фиксированного положения в положение соседней секции. Это искусственное «перешагивание» секций АС осуществляется мелкими шагами путем поочередного подключения выходов рассматриваемой пары секций АС к одной нагрузке. Для управления коммутационными элементами интерполятора используются две импульсные последовательности с широтно-импульсной модуляцией, одна из которых инвертирована относительно другой. Для очищения интерполированных сигналов от продуктов модуляции и высокочастотных составляющих каждый выходной сигнал пропускается через НЧ-фильтр, а затем обрабатывается в ДФУ.

Принцип работы интерполятора ДН поясняется рис. 10.3. Если за промежуток времени перехода с одной секции на другую, т. е. за время изменения направления ДН на полный шаг, фазы возбуждающих сигналов изменять плавно, например, от φ_1 до φ_2 , то ДН за это время плавно повернется из положения I в положение

ние II. Следовательно, для обеспечения плавного сканирования в схеме тракта приема необходимо иметь устройство, плавно изменяющее фазы возбуждающих сигналов во время сканирования (см. рис. 10.3, а) — плавный преобразователь фаз (ППФ).

Принцип действия ППФ основан на изменении фазы результирующего сигнала с помощью амплитудной модуляции двух напряжений одинаковой частоты. На рис. 10.3, б представлена диаграмма векторного сложения двух напряжений U_1 и U_2 с различными фазами φ_1 и φ_2 . Напряжение U_1 изменяется по амплитуде от максимума до 0, а напряжение U_2 в это же время — от 0 до максимума. Результирующий вектор U_Σ — есть суммарное напряжение, которое изменяет при этом фазу φ от φ_1 до φ_2 .

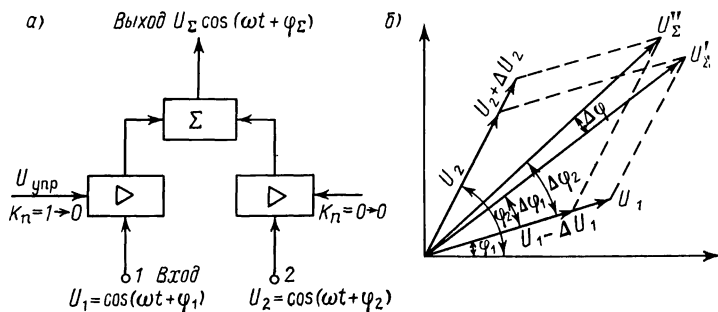


Рис. 10.3. Принцип работы интерполятора ДН: а — структурная схема ППФ; б — векторная диаграмма.

Схема ячейки ППФ состоит из двух усилителей и сумматора. Каждый усилитель с помощью управляющих сигналов может изменять коэффициент передачи: первый от 1 до 0, второй — от 0 до 1. На вход 1 поступает напряжение U_1 с фазой φ_1 , на вход 2 — напряжение U_2 с фазой φ_2 . В начальный момент времени, когда первый усилитель полностью открыт, а второй полностью закрыт, на выходе схемы имеется напряжение с фазой φ_1 . Затем управляющее напряжение $U_{упр}$ в первом усилителе начинает уменьшать коэффициент, а во втором — увеличивать. Амплитуда U_1 на выходе усилителя уменьшается, а амплитуда U_2 — растет. Сумматор производит векторное сложение указанных напряжений и на выходе ППФ появляется результирующее напряжение U_Σ с фазой $\varphi_\Sigma = \varphi_1 + \Delta\varphi_1$. В следующий момент за счет дальнейшего изменения коэффициентов передачи усилителей результирующее напряжение получает приращение фазы $\Delta\varphi_2$, которое отличается от $\Delta\varphi_1$ на малую величину $\Delta\varphi$. Процесс изменения фазы результирующего напряжения заканчивается в тот момент времени, когда первый усилитель полностью закрыт, а второй полностью открыт. В этот момент фаза выходного напряжения равна φ_2 . Промежуток времени, в течение которого фаза напряжения на выходе ППФ изменяется от φ_1 до φ_2 , называется перио-

дом плавного преобразования фаз. В начале этого периода выход ППФ подключен только ко входу 1, в конце — только ко входу 2. Набор таких ячеек совместно с электронным коммутатором осуществляет плавное сканирование ДН.

При использовании в приемном тракте гидролокатора каналов суммы и разности возможно искусственное сужение ДН при ее воспроизведении на электронном индикаторе. При этом линейные размеры АС не изменяются. Таким образом, цилиндрическая АС в сочетании с электронным переключателем, интерполятором и каналами суммы и разности обеспечивает в приеме плавное вращение узкой ДН в горизонтальной плоскости.

Так, в отечественном гидролокаторе одновременного кругового обзора «Угорь» с $2\theta_{0,7} = 10^\circ$ за счет использования устройства интерполяции, выполненного на элементах счетной техники (16 разрядов), «перешагивание» ДН в режиме приема составляет $0,6^\circ$. Использование же в приемном тракте каналов суммы и разности позволяет индцировать на электронном индикаторе ДН шириной $2-3^\circ$ вместо 10° . Все это качественно повышает пеленгационные возможности гидролокатора.

Для обеспечения наклона ДН в вертикальной плоскости электронным способом необходимо создать фазовое распределение сигналов по вертикали в режиме излучения, а в режиме приема — компенсацию этого фазового распределения. Для этого каждый канал АС должен быть дополнительно секционирован по вертикали. Так, для обеспечения наклона ДН на небольшой угол (до $7-10^\circ$) каждая секция антенны может состоять из двух частей, образуя верхний и нижний пояса антенны. Для обеспечения же наклона ДН на углы до $45-50^\circ$ количество поясов достигает 12. При этом объем аппаратной части гидролокатора увеличивается на $40-60\%$ и резко усложняется конструкция антенны. Так, в гидролокаторе «Угорь» с электронным наклоном ДН от -10 до $+45^\circ$ акустическая антенна состоит из 432-х преобразователей (каналов) с соответствующим количеством выводов.

Достоинством цилиндрических АС является то, что при сканировании ДН в горизонтальной плоскости не происходит ее расширения, так как величина сектора цилиндра, формируемого ДН, остается постоянной, вследствие чего не изменяется и величина боковых дополнительных лепестков, теоретический уровень которых равен 22% . В вертикальной же плоскости ДН при ее наклоне до 45° расширяется до 40% , а дополнительные максимумы возрастают до $30-35\%$. Уменьшение уровня боковых лепестков в вертикальной плоскости возможно путем введения амплитудного распределения вдоль образующей АС. Оптимальным распределением для линейных антенн является дольф-чебышевское, которое позволяет для реально ожидаемых разбросов в параметрах преобразователей снизить дополнительные максимумы до $15-20\%$.

В гидролокаторах с цилиндрическими АС и электронным наклоном ДН в принципе наиболее просто может осуществляться

стабилизация ДН в вертикальной плоскости по определенному, заранее выбранному, направлению пеленгования. В этом случае управление наклоном ДН производят от датчика угла вертикали и выбранного направления пеленгования, используя для этого фазирующие цепочки системы наклона. В секторах обзора, противоположных выбранному направлению пеленгования, при этом будет производиться наоборот дестабилизация ДН. Веер ДН в горизонтальной плоскости будет подобен «пульсирующему зонтику».

Количество преобразователей в цилиндрической АС должно быть примерно в три раза больше, чем для соответствующей плоской антенны с механическим наклоном и разворотом. Основной трудностью в использовании цилиндрических АС является необходимость в большом количестве электрических выводов и преобразователей.

В последнее время появились гидролокаторы кругового обзора с вырезанным сектором цилиндрической АС, в которой секции кормовой части удалены, а на их месте установлен механизм наклона АС. В этом случае канальность аппаратуры меньше, а электромеханический привод позволяет наклонять АС на большие углы (до 110°). Интересным представляется использование усеченных цилиндрических АС в эхолотах с целью получения веера ДН в плоскости, поперечной направлению движения судна, или стабилизации ДН по бортовой качке судна.

Следовательно, можно сделать вывод, что гидролокаторы одновременно кругового обзора без электронного наклона целесообразно использовать для поиска рыбы, находящейся на больших дистанциях и относительно небольших глубинах залегания; гидролокаторы же с электронным наклоном — на больших дистанциях и относительно больших глубинах залегания, а также для наблюдения за косяком рыбы при замете кошелькового невода. Гидролокаторы с вырезанным сектором могут быть использованы совместно с гидролокатором с электронным наклоном до 45° (или без него) при наблюдении за рыбным косяком и нижней подборкой кошелька на небольших дистанциях (до 100—200 м), когда требуется наклонять ДН на углы более 45° .

§ 10.4. Сферические антенны

После цилиндрических АС наиболее перспективным классом выпуклых антенн являются сферические антенны, которые позволяют осуществлять поворот ДН по всем углам только за счет коммутации элементов антенны. Однако на практике из-за сложных конструктивных особенностей они применяются довольно редко. В настоящее время только фирма «Simrad» использует в гидролокаторе SX200 сферическую антенну. Количество преобразователей, необходимых для такого «широкоугольного» обзора пространства, должно быть примерно в 5 раз больше по сравнению с плоской антенной с механическим поворотом. При этом значительные трудности возникают при разработке конструкции

антенны, обеспечивающей форму сферы из преобразователей при очень большом количестве электрических выводов. Управление ДН таких антенн должно осуществляться ЭВМ или микропроцессором.

Гидролокатор со сферической антенной позволяет производить быстрый и эффективный поиск в полусферическом объеме воды в пределах дальности действия самого гидролокатора. Этого можно достичь двумя режимами его работы: круговым и комбинированным обзорами.

При работе в режиме кругового обзора АС излучает луч в тонком слое горизонтального кругового сектора. Этот сектор может наклоняться электронным способом по вертикали в интервале от минус 10 до плюс 90° с очень узким угловым шагом (в гидролокаторе SX200 порядка 1,5°). Данный режим управления лучом напоминает открывание и закрывание зонта и полностью решает проблему «слепых зон» под судном и вблизи его, которые имеются даже при использовании гидролокаторов с цилиндрическими АС.

В комбинированном режиме поиска гидролокатор излучает луч как способом, аналогичным описанному выше, но в секторе 180°, так и в вертикальном полусекторе обзора эхолотного режима, при котором луч сканируется электронным способом в вертикальной плоскости в пределах 180° за определенное количество шагов. При этом ориентация вертикального сектора изменяется шагами также и в горизонтальной плоскости. Таким образом, за несколько импульсов посылки осматривается вся полусфера под судном. Кроме того, сферическая антенна в данном случае позволяет осуществлять электронную стабилизацию гидроакустического луча в пространстве одновременно в двух плоскостях. Воспроизведение целей в этом режиме можно производить на одном электронном индикаторе с разделением полей индикации для информации гидролокатора (верхняя половина экрана) и эхолотной информации (нижняя половина экрана).

Управление режимами работы гидролокатора со сферической АС должно производиться программированным процессором, который также может снабжаться программой для автоматического слежения за целью.

§ 10.5. Размещение акустических систем на судне

Эффективность работы РПА во многом зависит от правильности размещения на судне ее приборов. Для каждого типа РПА существуют свои специфические требования, оговариваемые в технической документации [89]. Особо жесткие требования предъявляются к размещению на судне АС РПА. От места их установки во многом зависит уверенность в работоспособности аппаратуры и возможность обеспечения ею тактико-технических параметров, которые в свою очередь также в значительной степени зависят от уровня гидроакустических помех, воздействующих на АС. Поэтому при выборе места расположения подкиль-

ных АС РПА необходимо в первую очередь учитывать следующие требования:

- АС должны устанавливаться как можно дальше от источников механических и электрических шумов, таких, как двигатели, генераторы и другая мощная электронная аппаратура и т. п.;

- изменение гидродинамического давления в местах установки АС при изменении скорости судна должно быть минимальным;

- вблизи АС, особенно впереди их, не должно быть источников турбулентных потоков воды;

- АС не должны выходить из воды при качке судна;

- должно быть предотвращено попадание в район АС проходящих под днищем судна аэрированных слоев воды (пограничный слой воды, насыщенный пузырьками воздуха), для чего рабочая поверхность АС должна быть отнесена от днища судна на максимально возможное расстояние.

После определения возможных мест установки АС с учетом вышеперечисленных требований необходимо на основании предварительной оценки уровня шумов в местах их предполагаемого размещения выбрать место с наименьшим уровнем акустического шума [89]. В случае, если предварительная оценка уровня шумов будет свидетельствовать о невозможности установки АС, необходимо принимать специальные меры по снижению акустических помех работе РПА. Уменьшать их величину можно путем применения специальных экранов, выполняющих роль преграды шумам от механизмов, гребных винтов и т. п. Аналогичные экраны устанавливаются в некоторых типах конструкций самих антенн (плоские и др.) с противоположной стороны рабочей их поверхности.

Наиболее благоприятным местом установки АС является участок, расположенный ближе к носу судна, так как толщина пограничного слоя, содержащего пузырьки воздуха, и уровень гидроакустических помех на этом участке будет минимальным. Поэтому на практике принято размещать подкильные АС РПА в первой трети длины судна.

Основными источниками шумовых помех работе РПА являются следующие:

1. Шумы главного и вспомогательного двигателей, других силовых установок, передающих вибрацию на корпус судна, который излучает их в окружающую среду или передает (как структурный шум) прямо на АС. Эти шумы, усиливающиеся с возрастанием скорости судна, особенно ощутимы на скоростях, когда еще недостаточно сильны гидродинамические шумы. Спектр шума машин движущегося судна можно представить как суперпозицию непрерывного спектра низкого уровня и сильных дискретных составляющих, образующихся в результате процессов, создающих вибрацию.

2. Шумы гребных винтов, возникающие вследствие гидродинамического процесса, при котором возникает кавитация в завихре-

ниях, образующихся на кромках лопастей винта; кавитации на лопастях при возникновении отрицательных давлений; механических вибраций лопастей. С увеличением скорости судна давление шумов возрастает приблизительно пропорционально скорости в третьей степени, т. е. $p \approx kv^3$ [87], где k — коэффициент пропорциональности. Гидроакустические помехи, создаваемые гребными винтами, отличаются от шума машин как по природе, так и по частотному спектру [89]. Источником шума винта является главным образом шум кавитации, возникающий при его вращении. На концах и поверхностях лопастей вращающегося в воде винта создаются области разряжения, соответствующие отрицательному давлению. Если эти отрицательные давления становятся достаточно большими, возникает разрыв сплошности воды и начинается образование полостей в виде небольших пузырьков. Порождаемые кавитацией пузырьки через некоторое время «захлопываются» либо в турбулентном потоке, либо при столкновении с лопастями винта, и при этом генерируют сильные звуковые импульсы.

Другой важной категорией гидродинамического шума является шум от подводных выступов корпуса, оставляющих позади себя струю, которая может создать шум или даже вызвать вибрацию других частей обшивки корпуса. Особенно большой уровень шумов такого рода создают выступы, имеющие недостаточно обтекаемую форму. Он может достигать уровня, как и гидродинамический шум, вызванный обтеканием всей остальной части корпуса судна. К этой категории относится и шум разрушающегося носового буруна.

Значительное влияние на качество работы РПА (особенно эхолотов) оказывают пузырьки воздуха, насыщающие пограничный слой воды за счет попадания воздуха под корпус судна во время его движения (аэрированный слой). Это явление объясняется тем, что подавляющее большинство рыбопромысловых судов по своим конструктивным особенностям являются плоскодонными и значительную часть промыслового времени находятся порожними или в незагруженном положении, за счет чего носовая часть судна на волне выходит из воды, захватывая под корпус воздушный поток, который насыщает пузырьками воздуха слой воды под всем корпусом за счет движения судна. Это явление усугубляется при увеличении скорости судна, ухудшении гидрометеорологических условий и изменении курса судна, особенно при совокупности этих факторов. Толщина значительно влияющего на работу РПА аэрированного слоя у большинства рыбопромысловых судов составляет 300—400 мм. Влияние пузырьков воздуха на работу РПА может быть объяснено двумя эффектами: поглощением и рассеиванием звука на пузырьках, а также изменением скорости звука в воде, содержащей пузырьки воздуха. В практике эксплуатации РПА (особенно эхолотов) при определенных метеословиях часто встречается эффект, когда аппаратура на некоторое время перестает производить регистрацию на любых дистанциях или наблюдается большое количество пропусков регистрации, на-

столько велико влияние аэрированного слоя. Этот эффект получил название «захлебывание». На увеличение концентрации аэрированного слоя указывает также тот факт, что при ухудшении работы РПА (пропадание индикации и записи) амплитуда зондирующего импульса на выходе генератора резко изменяется по сравнению с величиной, измеренной при нормальной работе аппаратуры [89].

Общая схема формирования помех работе РПА представлена на рис. 10.4. Каждый из указанных источников помех требует своих мероприятий для уменьшения их влияния. Некоторые из них

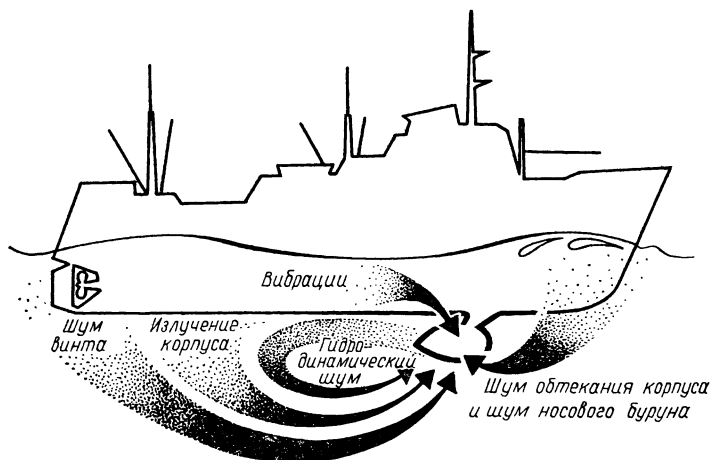


Рис. 10.4. Схема формирования судном помех работе РПА.

дорогостоящие и порой неприемлемы для рыбопромысловых судов. Однако вклад каждого из указанных основных источников помех работе РПА в общий их уровень может быть частично снижен путем разработки и использования более совершенных конструкций ПВУ и обтекателей АС.

Подкильные антенны РПА размещаются на судне либо способом непосредственной установки их в корпусе судна (эхолотные антенны), либо расположением на специальных устройствах (преимущественно антенны гидролокаторов), позволяющих производить выдвижение их за обводы судна (ПВУ). Магнитострикционные антенны эхолотов ранних разработок вваривались непосредственно в корпус судна заподлицо с его обводами и не требовали специальных устройств защиты от возможных механических повреждений. Антенны гидролокаторов всегда устанавливались в специальный обтекаемый корпус — гидроакустический обтекатель, позволяющий значительно снизить гидродинамические шумы, сводя к минимуму турбулентный поток и влияние аэрированного слоя, задерживая наступление кавитации и удаляя источник шума от антенны. В связи с применением в РПА антенн из пьезокерамики,

введением различных устройств их стабилизации и с целью исключения влияния аэрированного слоя на работу аппаратуры антенны современных эхолотов также стали размещаться в обтекателях. Конструктивно обтекатели бывают разные, но им всегда стараются придать более обтекаемую форму с учетом их места

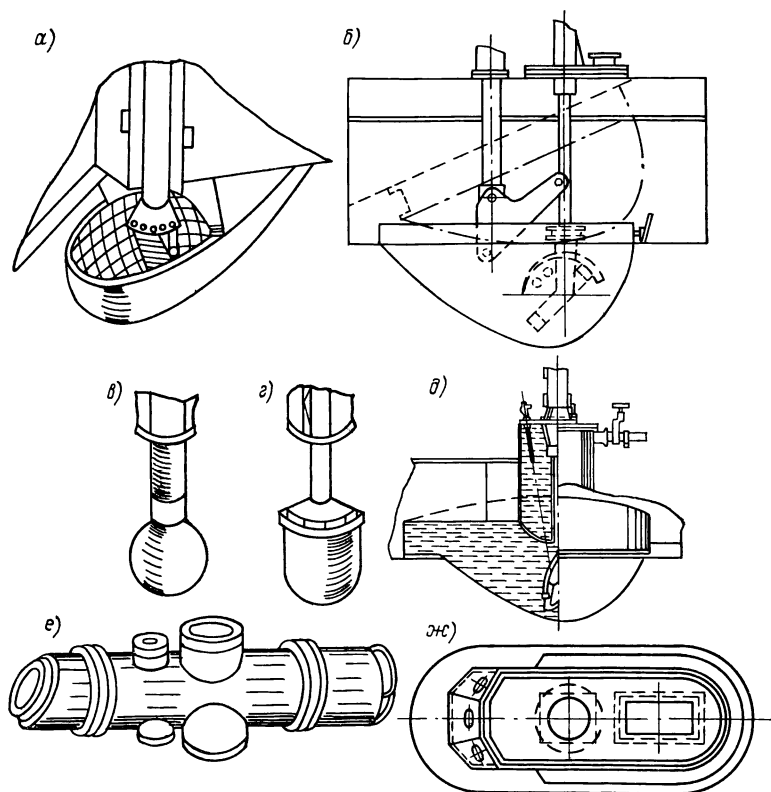


Рис. 10.5. Конструкции обтекателей антенн РПА: *а* — стационарный; *б* — стационарный, убирающийся во внутрь судна; *в*, *г* — штатные на выдвижных устройствах гидролокаторов; *д* — стационарный гибкий (эластичная резина); *е* — приемо-передающее устройство с антеннами системы контроля параметров орудий лова; *зс* — эхолотный металлический стационарный типа «Утлюг».

расположения и назначения. Некоторые типы конструкций обтекателей представлены на рис. 10.5. Как правило, большая часть поверхности обтекателя представляет собой акустически прозрачную конструкцию. В эхолотных обтекателях и обтекателях буксируемых антенн часто применяют акустически прозрачные мембраны, перекрывающие активную поверхность АС с учетом возможных углов ее отклонения от горизонта. Так как к акустически непрозрачной части обтекателей особых конструктивных требований не предъявляется, то в дальнейшем, ведя речь об обтекателе,

будем иметь в виду прежде всего его акустически прозрачную часть.

Акустические и механические требования к конструкции обтекатели очень жесткие. Обтекатели, предназначенные для защиты АС от набегающего потока и возможных механических повреждений, от помех гидродинамического происхождения, должны обеспечивать высокий коэффициент звукопрозрачности (не менее 0,9—0,95), высокую механическую прочность и минимальные амплитудно-фазовые искажения. Последнее требование означает, что в обтекателе должно отсутствовать внутреннее зеркальное отражение от стенок. Внутренние отражения в обтекателях значительно снижаются путем создания горизонтальной и особенно вертикальной кривизны его стенок, т. е. изготавливать обтекатели необходимо из возможно более легких звукопрозрачных материалов, позволяющих создавать криволинейные обтекаемые формы, чтобы предотвратить возникновение кавитации на его поверхности при максимальных скоростях судна. Сложность выполнения такой конструкции обусловлена противоречивостью предъявляемых к ней требований. Так, требованию высокой звукопрозрачности удовлетворяют простейшие конструкции обтекателей — сплошные тонкие однослойные оболочки, но они имеют малую механическую прочность. Увеличение прочности обтекателя за счет толщины приводит к значительному снижению прозрачности оболочки, вызывающей амплитудно-фазовые искажения, т. е. искажения ДН.

На обтекатель в потоке воздействуют местные возбуждения в виде изгибающего момента, приводящие к появлению шума. Поэтому обтекатели, изготовленные из стали, резины или других материалов, обладающих собственным резонансом, возбуждают в камере обтекателя широкополосную помеху. Так, в эхолоте «Прибой-101» при использовании в обтекателе антенны плоской стальной с ребрами жесткости мембраны наблюдалась мертвая зона до 15 м, получившая название «борода». Обтекатели из материала, имеющего большие потери при изгибе, практически лишены этого недостатка. Обтекатели из пластмасс и стеклопластиков, наиболее часто используемые в современной РПА, обладают хорошей звукопрозрачностью в широком диапазоне частот, имеют незначительную амплитуду колебаний, дают хорошее согласование акустического импеданса обтекателя с импедансом воды, имеют высокие характеристики демпфирования и почти не влияют на параметры АС.

При конструировании обтекателей значительных габаритов с целью повышения их прочности применяют ребра жесткости в виде ферм с конфигурацией, соответствующей принятой форме обтекателя (см. рис. 10.5, а). Естественно ребра жесткости увеличивают затухание акустической энергии в обтекателе. Форму, размер ребер жесткости и расстояние между ними необходимо выбирать для каждого конкретного случая с учетом материала ребер и обтекателя и с обязательной натурной проверкой обтекателя на звукопрозрачность, так как подобные конструкции плохо под-

даются расчету. Подкрепляющий реберный набор в оболочках эхолотных обтекателей использовать не рекомендуется.

Хорошо себя зарекомендовала в качестве звукопрозрачной мембраны эхолотных обтекателей («Сарган-Э») перфорированная титановая или из нержавеющей стали структура толщиной до 25 мм с коэффициентом перфорации $\varepsilon = 0,6$, обеспечивающая коэффициент прозрачности на частотах 20—30 кГц не ниже 0,9. Но она плоская и трудоемка в изготовлении. В последнее время интенсивно внедряются на промысловые суда специальные стационарные металлические слабо обтекаемой формы устройства, привариваемые уже совместно с антенной к корпусу судна (см. рис. 10.5, ж), снизу закрываемые звукопрозрачной мембраной, получившие название «блистеры». Основное их назначение — вывести антенны эхолота за пределы аэрированного слоя. В задней части таких обтекателей успешно размещаются приемные антенны систем контроля параметров орудий лова.

Для буксируемых антенн в условиях больших глубин и больших скоростей буксировки более перспективными являются многослойные оболочки (металл—вода—металл, армированные пластмассы и др.) обтекателей, имеющие меньшую вибровозбудимость и большую механическую прочность по сравнению с однослойными (при одинаковой прозрачности).

Для рыбопоисковых гидролокаторов в настоящее время чаще всего используются цилиндрические (см. рис. 10.5, з), сферические (см. рис. 10.5, в) и каплеобразные обтекатели, закрепленные на штоке ПВУ, позволяющего убирать обтекатель в патрубок, вмонтированный в корпус судна. Основным преимуществом их использования в условиях рыбного промысла является: возможность подъема за обводы судна, простота конструкции, так как обтекатель просто крепится на шток и не требует никаких дополнительных устройств или систем; возможность осматривать, настраивать или ремонтировать антенну без ее демонтажа при доковании судна или на плаву с помощью водолаза.

При поисковых скоростях судна до 10 уз (суда старой постройки) помехи работе РПА, обусловленные в основном уровнем собственных шумов судна, незначительно ограничивали поисковые возможности гидролокаторов, использующих указанные выше конструкции обтекателей. Наилучшие результаты показала примененная в гидролокаторе «Палтус» конструкция ПВУ с эллиптическим штоком и каплеобразным обтекателем, выдвигающимся на 1200 мм за обводы судна.

ПВУ имеют и отрицательные стороны, которые резко проявляют себя с увеличением скорости судна при поиске рыбы. Для подъема обтекателя установка ПВУ предусматривает открытый патрубок. Наличие такого углубления на корпусе судна нарушает обтекаемость, делая поток турбулентным. Таким образом, патрубок является источником шума, расположенным в непосредственной близости от АС. Выдвинутые на штоке АС с обтекателями вибрируют под воздействием турбулентного потока. Частота коле-

баний штока и обтекателя низкая и находится за пределами рабочих частот РПА, но при этом в ПВУ, штоке и механизмах крепления и управления поворотом и наклоном АС могут возникать стуки и резонансные явления, создающие вибрационные или структурные шумы в рабочем диапазоне прибора. Использование круглых штоков и сферических обтекателей (гидролокаторы «Сарган-Г», «Таймень» и др.) не является лучшим вариантом обеспечения их обтекаемости.

Исходя из необходимости повышения скорости судна при поиске и снижения уровня гидродинамических помех (улучшение соотношения сигнал/шум) для средне- и крупнотоннажных судов перспективной является установка АС в стационарных обтекателях (см. рис. 10.5, а, б). Установка стационарного обтекателя из твердых материалов, например, из пластмасс и стеклопластика (гидролокаторы «Финвал», «Угорь»), значительно снижает уровень помех работе РПА, устранив ряд источников собственных шумов: исключается возможность образования турбулентного потока патрубка, а также вибрационные и структурные шумы, возникающие в конструктивных элементах ПВУ, образующиеся в результате обтекания штока и обтекателя турбулентным потоком. Кроме того, значительно снижается уровень шумов винта путем установки воздушного экрана в кормовой части обтекателя. При этом в одном стационарном обтекателе практически можно разместить две антенны (одновременно гидролокатора и эхолота). Наличие на корпусе судна стационарного обтекателя усложняет эксплуатацию судна, так как увеличивает риск его повреждения в порту, при работе во льдах и с кошельковым неводом.

Эти недостатки стационарного обтекателя устраняются использованием в его конструкции мембраны из эластичной резины (см. рис. 10.5, д). В патрубок, где размещается АС в поднятом состоянии, и в объем жесткого герметичного основания обтекателя по необходимости подается забортная вода под давлением, которая надувает эластичную мембрану, придавая ей форму, близкую к расщеченной по оси капле [29, 39]. При этом давление внутри образовавшегося обтекателя достигает 1,2—1,4 атм. и в дальнейшем автоматически поддерживается на этом уровне. Таким образом обтекатель приводится в рабочее положение, его нижняя точка при надуве отходит примерно на 550 мм от первоначального плоского состояния. После этого возможен спуск АС в полость обтекателя.

Практически установлено, разностный уровень помех для гидролокаторов с выдвижным обтекателем на штоке и для гидролокатора со стационарным гибким обтекателем составляет порядка 20 дБ. Согласно формуле (5.15) за счет такого снижения помех может быть получено увеличение энергетической дальности обнаружения тех же целей примерно на 75 %, т. е. обследование какой-то площади может быть проведено за меньшее время или выполнено на повышенных скоростях. Приращение дальности обнаружения на указанную величину в гидроакустике весьма

значительно. Если в целях повышения надежности обнаружения считать, что переход на использование стационарных гибких обтекателей приведет к снижению помех РПА на 15 дБ, то дальность действия гидролокатора увеличится примерно на 50 %, что эквивалентно увеличению энергетической мощности генераторного устройства аппаратуры в 11 раз.

Гибкий обтекатель в рабочем положении поддерживается созданным в нем внутренним давлением равным 1,2—1,4 атм. Это еще одно положительное решение конструкции обтекателя, так

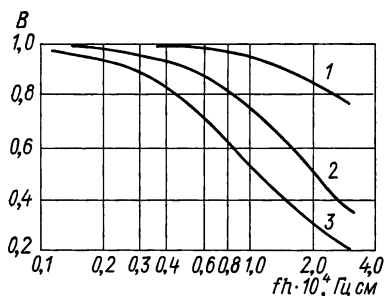


Рис. 10.6. Зависимости коэффициентов звукопрозрачности B для материалов: стеклопластик (кривая 1), титан (кривая 2) и сталь (кривая 3).

как повышенное давление на антенну позволяет подавать на нее большую мощность, отодвигая ее уровнем кавитации. Соотношение между удельной интенсивностью, достаточной для кавитации, $I_{\text{кв}}$ (Вт/см²) и глубиной нахождения излучателя H (м) определяется эмпирической формулой

$$I_{\text{кв}} = 0,3 (0,1H + 1,8)^2. \quad (10.6)$$

При установке гидролокаторов на среднетоннажных судах АС находятся на глубине порядка 5 м. При этом АС, установленные в обычных обтекателях, допускают интенсивность излучаемых импульсов

$$I_{\text{кв}} = 0,3 \cdot (0,1 \cdot 5 + 1,8)^2 = 1,6 \text{ Вт/см}^2.$$

Антенны, находящиеся под давлением 1,2 атм, что соответствует их нахождению на глубине 12 м, допускают

$$I_{\text{кв}} = 0,3 \cdot (0,1 \cdot 12 + 1,8)^2 = 2,7 \text{ Вт/см}^2,$$

что позволяет на тот же излучатель подавать импульсы мощностью на 70 % больше. Согласно формулам (5.10) и (5.15) это дополнительно может увеличить дальность обнаружения цели примерно на 6 %.

Вышеизложенное говорит о целесообразности использования стационарных гибких обтекателей для АС гидролокаторов.

Полученные теоретически и проверенные экспериментально выражения для расчета потерь и зеркальных отражений показали, что эти потери возрастают с частотой и увеличением толщины и плотности материала стенок обтекателя [96]. Энергетический коэффициент прохождения B (по мощности, интенсивности) через оболочку обтекателя при нормальном падении волны рассчитывается по формуле [64]

$$B = [1 + \frac{1}{4} (\rho_1 c_1 / \rho_2 c_2 - \rho_2 c_2 / \rho_1 c_1)^2 \sin^2 2\pi h f / c_1]^{-1}, \quad (10.7)$$

где c_1, c_2 — скорости звука в воде и в материале оболочки, см/с; ρ_1, ρ_2 — плотности воды и материала оболочки, г/см³; h — тол-

щина оболочки, см; f — рабочая частота РПА, Гц. Зависимости значений коэффициентов B для стеклопластика, титана и стали, рассчитанные по формуле (10.7), приведены на рис. 10.6.

§ 10.6. Устройства стабилизации

Автоматические устройства, удерживающие заданное положение в пространстве луча антенны РПА, называют системами стабилизации [10].

Устройства стабилизации ДН РПА подразделяются на косвенные, воздействующие на пространственное положение АС, формирующей ДН, и непосредственные, воздействующие на ДФУ при ориентации ДН в пространстве. В зависимости от количества возмущающих факторов, учитываемых при пространственной стабилизации ДН, устройства стабилизации подразделяются на одноосные, двухосные и трехосные [39]. Одноосные системы стабилизируют ДН по одному углу (углу крена, дифферента или по пеленгу). Наиболее распространены системы, стабилизирующие по углу крена. Двухосные системы обеспечивают наведение ДН по курсовому углу и углу места. Трехосные системы обеспечивают полную стабилизацию ДН по трем названным углам. По конструктивному исполнению стабилизирующие устройства РПА подразделяются на механические, электромеханические, гидравлические и электронные [39].

Механическая система стабилизации АС является наиболее простой и осуществляется путем крепления АС в карданном подвесе и выбора определенных параметров полученного маятникового устройства. Центр тяжести маятниковой системы смещен относительно точки подвеса с помощью регулировочного груза. Необходимым условием стабилизации маятниковой системы является выполнение неравенства $T_0 \gg T_c$, где T_0 — период собственных колебаний маятниковой системы; T_c — период возмущающих колебаний, т. е. период колебаний судна. Для депфирования колебаний маятника используются жидкости определенной вязкости. Обычно они заливаются в судовую шахту, в которой монтируется весь узел маятниковой системы. Вязкость используемой жидкости определяется из условия минимального времени прихода маятника в устойчивое положение равновесия при любом отклонении от него.

Разновидностью устройств маятниковой системы стабилизации является стабилизация с помощью добавления к АС положительной плавучести, получившей название «поплавок». Стабилизации с помощью поплавка присущи все недостатки маятниковой системы. Основная из них — невысокая точность стабилизации, увеличивающаяся при циркуляции и изменении скорости движения судна. Однако благодаря простоте, отсутствию необходимости использования специальных приборов и устройств для выработки углов вертикали, для контроля углов отклонения АС и удержания ее в плоскости горизонта, АС с механической стабилизацией

находят широкое применение. Наибольшее применение поплавковые системы нашли для стабилизации эхолотных АС. Они успешно использованы в отечественных рыбопоисковых эхолотах «Кумжа», «Прибой-101», «Сарган-Э» и «Лещ-Б». Конструкция стабилизированной АС эхолота «Кумжа» представлена на рис. 10.7.

В области создания конструктивов подобных систем стабилизации имеется большое количество авторских свидетельств и патентов. Оригинальная по своему конструктивному решению система механической стабилизации для АС гидролокаторов разработана фирмой «Wesmar» (США). Система была усовершенствована фирмами ФРГ и Японии, но известность получила под названием Wesmar. В ней ориентация антенны в пространстве

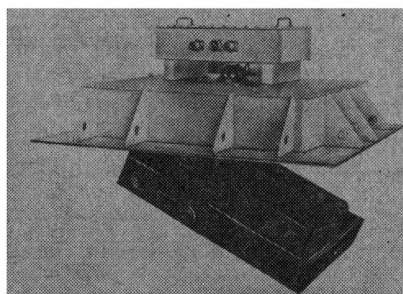


Рис. 10.7. АС эхолота «Кумжа» с поплавковой системой стабилизации.

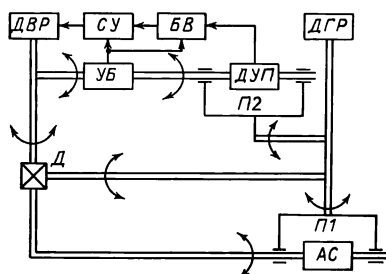


Рис. 10.8. Структурная схема устройства электромеханической стабилизации АС гидролокатора.

производится электромеханическими приводами. В любом зафиксированном положении она выполняет функции маятника относительно установившегося направления ДН. Такая конструкция стабилизации пригодна для малогабаритных гидролокаторов с небольшими антеннами (до 10 кг), так как почти все кинематическое устройство управлением АС располагается в ее обтекателе.

Системы стабилизации АС с электромеханическим приводом значительно сложнее механических систем. В качестве датчиков вертикали в этих следящих системах используется чаще гировертикаль, реже — простейший физический маятник. В эхолотах в этом случае АС закрепляется в двухосном карданном подвесе, причем одна ось параллельна диаметральной плоскости судна, другая — мидельной. На каждой оси вращения закреплен датчик угла, с которого снимается напряжение, пропорциональное углу отклонения АС относительно горизонта. Напряжения, пропорциональные углам отклонения от вертикали, снимаемые с датчиков вертикали, и напряжения, пропорциональные углам отклонения АС от горизонтальной плоскости, сравниваются. Получаемая разность после усиления подается на следящие приводы, разворачивающие АС до тех пор, пока разность напряжений не станет равной нулю.

При отсутствии управляющего сигнала АС будет находиться в плоскости горизонта с точностью, обусловленной качеством работы следящего привода. Такая конструкция системы стабилизации использовалась в первых образцах отечественного эхолота «Прибой-101». Норвежская фирма «Simrad» выпускает платформу с электромеханической стабилизацией для установки в ней АС массой до 200 кг. Фирма «Elac» (ФРГ) производит эхолот Schelfrandlot-1Co с подобной электромеханической стабилизацией АС для научно-исследовательских судов.

Устройства электромеханической стабилизации АС успешно применяются и в гидролокаторах. При этом чаще всего используются электрические цепи следящих приводов разворота и наклона антенны. Наиболее интересна простая конструкция устройств стабилизации АС гидролокатора, в которой используется только одна цепь следящего привода управлением антенны по ее наклону в вертикальной плоскости. На рис. 10.8 приведена функциональная схема такого устройства, работающего следующим образом. При установке АС в заданное положение одновременно с разворотом двухосного подвеса (П1) в горизонтальной плоскости синхронно разворачивается двухосный подвес (П2) с закрепленным на нем датчиком угловых перемещений (ДУП), ориентируя плоскость замера углов отклонения датчика по направлению ДН антенны. При развороте АС в вертикальной плоскости устройство блокировки (УБ) отключает кинематическую связь ДУП с двигателем вертикального разворота (ДВР) и выдает запрет на блок включения (БВ) устройства стабилизации. После установки АС в заданное положение УБ замыкает связь ДУП с ДВР и дает разрешение через БВ на работу устройства стабилизации. При отклонении ДН АС от заданного положения за счет воздействия качки на судно ДУП через БВ выдает сигнал на схему управления (СУ) двигателем вертикального разворота, который в зависимости от знака сигнала рассогласования разворачивает АС и ДУП в сторону, противоположную углу качки судна. При совпадении плоскости установки ДУП с плоскостью горизонта сигнал стабилизации перестает поступать на СУ двигателем вертикального разворота и АС останавливается в заданном направлении. Цикл работы стабилизации повторяется синхронно с периодом волнения моря. С целью исключения влияния воздействия при перемещении АС в горизонтальной плоскости на положение ДН в вертикальной плоскости ДВР кинематически связан с одним входом механического дифференциала (Д), второй вход которого кинематически связан с двигателем горизонтального разворота (ДГР). Вход Д кинематически связан с осью вертикального разворота двухосного подвеса П1 АС, который также кинематически связан с ДГР. В описанном устройстве используется одноплоскостной датчик угловых перемещений и отсутствует блок преобразования координат.

Электромеханическая стабилизация по сравнению с механиче-

ской имеет ряд преимуществ, главные из которых — высокая точность углов отработки (до $\pm 0,5^\circ$) и способность работать при любом виде качки.

К недостаткам следует отнести:

- сложность герметизации исполнительных электрических устройств, так как им приходится работать в условиях высокой влажности в нижних отсеках судна (в непосредственной близости от АС);

- наличие электрических наводок, источником которых являются управляющие напряжения, поступающие на электродвигатели приводов;
- наличие напряжения повышенной частоты для следящих приводов систем;
- наличие датчиков углов вертикали.

Несмотря на недостатки и относительную сложность в изготовлении, настройке и регулировке, данная система стабилизации заслуживает внимания и используется в новых разработках РПА.

Устройства стабилизации с гидравлическим приводом в РПА известны двух разновидностей;

- стабилизация платформы, на которой устанавливается АС; этот вид стабилизации на промысловых судах используется редко из-за больших габаритов и массы платформы, он находит применение в основном на крупных научно-исследовательских судах;

- ПВУ со стабилизацией АС; этот вид стабилизации используется в РПА.

Рис. 10.9. Конструкция гидравлической системы стабилизации АС гидролокатора.

Рассмотрим одну из оригинальных конструкций гидравлической системы стабилизации, воздействующей непосредственно на шток ПВУ, рыбопоискового гидролокатора «Пикша» (рис. 10.9) [39]. Шток ПВУ проходит через втулку и шар (находящийся в шаровом подпятнике), которые в паре выполняют роль карданного подвеса. Шаровой подпятник состоит из двух частей: основания и крышки. Основание закреплено в платформе и имеет две оси в направлении «нос—корма», на которых свободно качается вилка, имеющая на боковых сторонах дугообразные вырезы, в которых катаются ролики втулки. Втулка в верхней части имеет площадку, на которой закреплен подъемник и упор для фиксации штока ПВУ в нижнем (опущенном) положении. На вилке установлены: два гидроцилиндра, штоки которых шарнирно укреплены на втулке, два зубчатых сектора и два механических упора для ограничения углов наклона по килевой качке. Два других гидроцилиндра, расположенные в вертикальной плоскости, перпендикулярной вертикальной плоскости качания вилки, укреп-

лены на платформе. Штоки их также шарнирно укреплены на боковых сторонах вилки. Герметизация уплотнений шара в шаровом подпятнике и штока ПВУ в шаре осуществляется с помощью резиновых колец круглого сечения; подвод рабочей жидкости в гидроцилиндры реализуется общеизвестными способами. Угловые перемещения по бортовой и килевой качкам производятся при помощи гидроцилиндров, наклоняющих вилку и втулку со штоком ПВУ (по крену) или втулку со штоком ПВУ относительно вилки (по дифференту) в стороны, противоположные крену и дифференту судна.

Таким образом, шток ПВУ с АС сохраняет в пространстве заданное положение при бортовой и килевой качках, т. е. он перемещается в двух взаимно-перпендикулярных плоскостях на тот же угол и с теми же периодами, что и наклоны судна, только в обратном направлении. Шар, охватывающий шток ПВУ, выполняет при этом роль карданного подвеса, обеспечивая его наклоны в любом направлении без нарушения герметизации. Положение штока ПВУ в пространстве (положение АС) контролируется сельсинами-датчиками, а по углам рассогласования — синус-косинусными вращающимися трансформаторами.

В принципе, исполнительные цилиндры систем стабилизации с гидравлическим приводом могут воздействовать непосредственно на АС, но в этом случае усложняются сами приводы и возникают затруднения применения обтекателя для АС.

Электронная стабилизация ДН АС находит в последнее время широкое распространение в РПА. При электронной стабилизации сканирующая многоэлементная АС жестко закрепляется на корпусе судна и участвует во всех угловых перемещениях, а ось ее ДН сохраняет в пространстве заданное направление.

Угол поворота оси ДН АС можно изменять, используя временную или фазовую компенсацию. При временной компенсации осуществляется электрическая задержка на определенную величину сигнала, поступающего на каждый преобразователь АС. При фазовой компенсации осуществляется сдвиг фаз возбуждения преобразователей АС, для чего используются ЛЗ, фазовращатели или цифровые ДФУ (см. § 11.4).

Необходимый угол поворота ДН АС и, следовательно, временная задержка сигнала или сдвиг фазы, задаются сигналами, поступающими с датчика вертикали. Одна из функциональных схем тракта излучения эхолота с электронной стабилизацией ДН АС и временной компенсацией приведена на рис. 10.10 [39].

Стабилизация ДН осуществляется следующим образом. Импульс с блока запуска (БЗ) запускает генератор пилообразного напряжения (ГПН). При крене судна на один из бортов сигнальное напряжение, возникающее в датчике крена (ДК), подается на фазочувствительный детектор (ФЧД). Изменение фазы сигнального напряжения на выходе датчика крена относительно опорного напряжения определяется фазочувствительным детектором. Детектор выдает напряжение, полярность которого определяется

креном на правый или левый борт, а амплитуда — пропорциональна величине угла крена судна. Это напряжение через регулятор управления смещения (РУС) подается на каскад запуска генератора (КЗГ). Генератор (Г) вырабатывает импульс, который подается на акустическую систему (АС). Каскад генератора работает таким образом, что время запуска генератора определяется амплитудой и полярностью управляющего смещения, а также порядковым номером преобразователя в АС. В результате АС формирует ДН, повернутую на величину угла крена, но с обратным знаком, т. е. направленную по вертикали.

В режиме приема формирование стабилизированной ДН в сущности означает компенсацию разности моментов прихода эхосигнала к элементам АС, обусловленной их положением в пространстве относительно фронта волны принимаемого сигнала [67]. Для формирования ДН в случае плоского фронта волны надо в каждый фиксированный момент времени, определив расстояние ρ_i от элементов АС до некоторой плоскости объекта, параллельной фронту волны, задержать колебания с выходов элементов

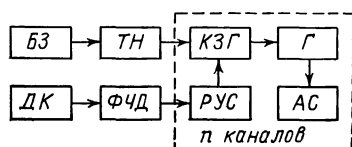


Рис. 10.10. Структурная схема электронной системы стабилизации ДН в режиме излучения.

АС на время $\tau_i = \rho_i c$, а затем просуммировать их. Обычно при расчете задержек используется среднее значение скорости звука в воде $c = 1500$ м/с. Отклонения ее в различных районах промысла могут достигать величины порядка ± 50 м/с, что приводит к изменению необходимой временной задержки более чем на 3 % и, как следствие — к искажению ДН. Поэтому в ДФУ должна поступать информация не только о составляющих качки судна, но и о скорости звука в районе промысла.

Электронный метод стабилизации оси ДН АС эффективно реализуется средствами цифровой техники (см. гл. 11 и 12). Внедрение последней в область дискретного формирования ДН АС позволяет формировать «веер» ДН с учетом гидрологических условий и перемещений судна, а также гибко управлять каждой ДН в том числе и ее формой. Особо важным преимуществом дискретного формирования по сравнению с аналоговыми является возможность унификации ДФУ для различных типов АС. Возможны два типа дискретного формирования ДН АС во временной области с учетом информации о качке судна. В первом случае отсчеты сигнала на выходе элемента АС выбираются в моменты времени, определяемые поступающей из ДФУ величиной требуемой задержки τ_i , во втором — отсчеты сигнала в требуемые моменты времени восстанавливаются тем или иным интерполяционным методом по совокупности исходных равноотстоящих отсчетов, поскольку поступившие из ДФУ задержки τ_i в общем случае не кратны шагу дискретизации. Электронная система стабилизации ультразвукового луча используется в отечественных эхолотах

«Таймень», в эхолотах Hamber KH-407 и Atlas Fischfinder 791DC.

Для изменения направления ДН АС в двух плоскостях схемы ДФУ и коммутации элементов антенных решеток значительно усложняются и резко возрастает количество каналов генераторов и усилителей. Поэтому в РПА такие системы пока не используются.

Возможна принципиально другая система стабилизации: ни АС, ни ДН не стабилизируются, а поправка на качку в вычислительное устройство вводится при измерении координат объекта. Однако практического применения этот метод пока не находит.

Косвенные факторы, влияющие на стабилизацию акустического луча антенн. К косвенным факторам относятся такие, которые хотя и влияют в большой степени на стабилизацию ДН антенны РПА, но при разработке аппаратуры только для этих целей специально не предназначаются [39].

В первую очередь к ним относится применение буксируемых антенн. Последние буксируются на глубинах, где отсутствует волнение моря и получается почти идеальная стабилизация ДН за счет воздействия встречного потока воды на буксируемое тело. Вторым косвенным фактором можно назвать увеличение количества посылок зондирующих импульсов в единицу времени. В целом это влияет на повышение информативности об объекте промысла. При волнении моря увеличение числа зондирующих импульсов приводит к уменьшению количества пропусков за счет качания ДН. Применение в современной РПА элементов электронной памяти с последующим неоднократным воспроизведением информации на регистраторах, специальных устройств типа «Привязка к грунту» и неоднократным воспроизведением этой информации между зондирующими импульсами, а также использование новых регистрирующих устройств типа панорамных регистраторов значительно повышает информативность аппаратуры и снижает влияние качки моря на эффективность работы РПА.

Применение в РПА стабилизированных узких ДН дает на рыбном промысле следующие преимущества:

- резко увеличивается вероятность обнаружения объекта;
- повышается эффективность применения РПА как в мелководных так и в глубоководных районах;
- повышается разрешающая способность по дальности и расширяются пределы измеряемых дистанций за счет концентрации энергии в зондирующем импульсе;
- появляется возможность осуществления автоматического сопровождения косяка рыбы;
- появляется возможность количественной оценки рыбных скоплений;
- повышается точность определения ядра косяка;
- улучшается работа устройств «Белая линия», «Привязка к грунту», «Стробирование» и др.;
- повышается точность и однозначность определения рыбных скоплений.

В заключение следует отметить следующее. Системы механической стабилизации отличаются низкой стоимостью, простотой, не нуждаются в регулировке, настройке и дополнительных контрольных проверках. Их реализация не требует специальных дорогостоящих датчиков координат. Поэтому они находят широкое применение в РПА, несмотря на сравнительно невысокую точность обработки АС при нерегулярном волнении моря, циркуляции или изменении скорости движения судна.

Системы электромеханической стабилизации находят довольно широкое применение в РПА и устанавливаются, как правило, на средних и крупных судах. Они обеспечивают достаточно высокую точность и скорость обработки стабилизирующих АС. В таких системах исполнительные двигатели хорошо сопрягаются с синхронно-следящей системой. При электромеханической стабилизации возникают трудности в защите исполнительных активных механизмов от влаги, так как они располагаются в непосредственной близости от АС, в гидроакустической шахте судна. Кроме того, возникают дополнительные акустические и электрические помехи за счет непрерывной работы редукторов и электродвигателей систем стабилизации, использования в следящих приводах напряжений повышенной частоты. Данные системы требуют наличия на судне датчиков координат, сложны в настройке и регулировке, требуют дополнительного внимания при их обслуживании.

Системы с гидравлическим приводом обладают высокой точностью обработки АС, обеспечивают большие моменты и скорости обработки. При их работе отсутствуют источники возникновения дополнительных акустических и электрических помех. Однако системы с гидравлическим приводом сложны в изготовлении и эксплуатации, громоздки, имеют большие габариты и массу. Поэтому применяются они в основном на крупных рыбопоисковых и научно-исследовательских судах. При работе системы также необходимо наличие на судне датчиков координат.

Электронная система стабилизации в последнее время находит широкое применение в РПА. Это стало возможным благодаря успехам микроэлектроники, внедрению в РПА элементов вычислительной техники, возможности создания секционированных АС с высоким КПД. При применении электронной стабилизации отпадает необходимость в сложных и громоздких механических устройствах, появляется необходимость использования одних и тех же узлов для стабилизации и сканирования ДН АС, тем самым повышается надежность аппаратуры при расширении ее тактических характеристик. Однако при электронной стабилизации заметно усложняется конструкция АС и коммутирующая электронная часть аппаратуры, особенно при осуществлении стабилизации ДН по двум параметрам — бортовой и килевой качкам, значительно возрастает число каналов трактов излучения и приема. Поэтому при электронной стабилизации чаще всего компенсируется только бортовая качка. Кроме того, применение электрон-

ной стабилизации в гидролокаторах практически затруднено из-за большого количества выводов в ПВУ. Но электронная стабилизация бесспорно наиболее перспективна и со временем станет основным типом стабилизации в РПА.

Глава 11 ТРАКТ ИЗЛУЧЕНИЯ

§ 11.1. Функциональный состав трактов излучения

Тракт излучения (ТИ) рыбопоискового прибора обеспечивает формирование требуемого электрического сигнала, который в заданный момент времени преобразуется в акустический. Функциональная схема тракта излучения РПА в общем виде представлена на рис. 11.1. В зависимости от технических параметров и назначения РПА она может несколько видоизменяться.

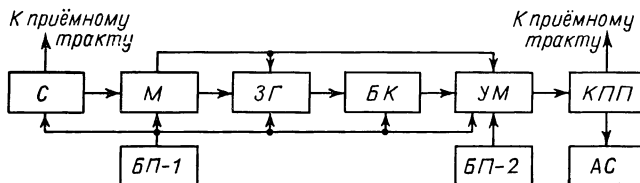


Рис. 11.1. Структурная схема тракта излучения РПА.

Устройство синхронизации (С), формирующее управляющее напряжение, обеспечивает синхронную работу трактов излучения и приема и позволяет измерять основной параметр РПА — расстояние до пеленгуемого объекта.

Блок управления колебаниями, чаще всего называемый модулятором (М), изменяет один из параметров незатухающих колебаний по закону передаваемого смыслового сигнала. Обычно он воздействует на задающий генератор (ЗГ), но может воздействовать на предварительный (буферный) каскад (БК) или непосредственно на усилитель мощности (УМ). Модулятор представляет собой ждущий мультивибратор с перестраиваемой длительностью импульсов, которые управляют оконечными каскадами ЗГ.

ЗГ предназначен для формирования высокостабильных электрических колебаний в определенном диапазоне частот. Стабильность частоты ЗГ зависит от характера смыслового сигнала, т. е. метода, используемого для определения расстояния до объекта, и в современной РПА составляет порядка 10^{-3} — 10^{-6} .

Предварительный (буферный) каскад (БК) ставится в том случае, когда мощности с ЗГ недостаточно для раскачки УМ или когда необходимо развязать УМ и ЗГ. Такая необходимость

возникает при получении от ТИ сигналов с высокой стабильностью по частоте излучения.

Усилитель мощности (УМ) — это оконечный каскад, его нагрузкой является акустическая система (АС). В качестве УМ применяются генераторы с внешним возбуждением, имеющие своей нагрузкой колебательные резонансные контуры. Как правило, УМ работают в нелинейном режиме, в котором можно теоретически получить КПД, приближающийся к 100 %. Различают три основных режима УМ: недонапряженный, критический и перенапряженный. Критический режим работы УМ наиболее выгодный, при этом от него отбирается наибольшая мощность. УМ трактов излучения РПА строятся по простым схемам: нагрузкой усилителя является одиночный контур, так как полоса частот электрического сигнала небольшая и определяется резонансной частотой АС.

Коммутатор приема-передачи (КПП) — это функциональный блок, обеспечивающий своевременное подключение АС к УМ. Кроме того, на КПП в РПА в отдельных случаях возлагаются обязанности сканирования и формирования ДН в пространстве. В случае, когда ТИ имеет несовмещенную антенну, она подключена постоянно к УМ.

Акустическую систему (АС), преобразующую энергию электрических колебаний в акустические, с точки зрения проектирования ТИ, представляя как нагрузку с активным и реактивным сопротивлением, которую необходимо согласовывать с каскадами УМ.

Блок БП-1 — стабилизированный низковольтный полупроводниковый источник питания. В современной РПА обычно БП-1 выдает напряжение 27 В. Собран он, как правило, по компенсационной схеме с последовательным регулирующим транзистором и питает все низковольтные схемы ТИ.

БП-2 — блок питания УМ. Состоит из выпрямителя и накопителя. Выпрямитель состоит из трансформатора и диодного мостика. В качестве накопителя используются электролитические конденсаторы на выходе мостика. Величина емкости C накопителя определяется максимальной длительностью импульса излучения и его мощностью. Допустимый спад вершины радиоимпульса на максимальной длительности импульса излучения принимается 30 %. Величина C , Φ , определяется по приближенной формуле

$$C = 100I_0\tau/kE_0, \quad (11.1)$$

где I_0 — величина тока в импульсе, А; τ — длительность импульса, с; E_0 — величина напряжения питания, В; k — допустимый спад вершины радиоимпульса, %. Мощность трансформатора $P_{тр}$ определяется по формуле

$$P_{тр} = 1,5P_{п}/Q, \quad (11.2)$$

где $P_{п}$ — мощность, потребляемая УМ в импульсе; Q — скважность.

Тракты излучения РПА подразделяются на одноканальные, многоканальные, с излучением сложных сигналов, с излучением,

обеспечивающим компенсацию эффекта Доплера за счет собственной скорости судна, а также управление поведением рыбы, и использующие эффекты нелинейной акустики.

Одноканальные ТИ подразделяются на одночастотные и многочастотные. Одноканальные одночастотные ТИ использовались в основном в ранних разработках РПА. Отличительная особенность таких трактов — максимальная простота генераторного устройства и минимальные его габариты даже при высоком уровне мощности излучения. В последнее время РПА работает на нескольких (двух, трех) значительно отличающихся друг от друга частотах. Например, отечественный комплекс «Сарган» — 20 и 135 кГц, РПА фирмы «Furuno» — 28 и 200 кГц, 50 и 200 кГц и др. (см. табл. 2). В этом случае ТИ содержит или не менее двух генераторов, работающих каждый на свой преобразователь и на своей частоте, или один автоматически переключаемый генератор для работы на одной из частот.

С повышением требований к РПА принцип построения одноканальных ТИ не меняется, но построение принципиальных схем отдельных узлов могут быть различны в каждом индивидуальном случае. Наиболее характерными представителями РПА с одноканальными ТИ являются: из отечественных — комплексы «Прибой-101», «Кумжа», из зарубежных — фирмы «Koden» «типа SR и SRM», фирмы «Furuno» типа FNY, FUG, FE, фирмы «Wesmar» типа SS и SG и др. (см. табл. 2).

Многоканальные ТИ входят в основном в состав сканирующих гидролокаторов, в последних разработках они включаются и в состав эхолотов с электронной стабилизацией ДН. Такие ТИ, несмотря на значительные усложнения аппаратной части по сравнению с одноканальными, существенно улучшают тактико-технические характеристики РПА и повышают ее надежность, так как они состоят из нескольких однотипных взаимозаменяемых каналов. Функциональная схема многоканального ТИ отличается от одноканального (см. рис. 11.1) тем, что между ЗГ и УМ размещается сканирующее устройство, а количество УМ соответствует количеству «элементарных» преобразователей (каналов) многоэлементной АС. Для этой группы РПА наиболее характерными являются: из отечественных — гидролокаторы «Финвал», «Пикша», «Угорь», комплексы «Таймень». Из зарубежных — фирмы «Krupp» гидролокатор Atlas Fishing Sonar 950 и эхолот Atlas Fischfinder 791DS, фирмы «Furuno» гидролокатор FSS-31C и др.

Тракты излучения со сложными сигналами находят все большее применение в новых образцах РПА. Чаще всего используются следующие два способа: излучение ЧМ-сигнала и излучение двух близких частот. Первый способ используется для уменьшения реверберационных помех и увеличения дальности обнаружения объектов без ухудшения разрешающей способности. Второй способ позволяет повысить направленность излучения при уменьшении боковых лепестков ДН. Наиболее характерными представителями РПА, ТИ которых работают в режиме сложного сигнала,

являются: из отечественных — аппаратура СКОЛ (линейное изменение частоты канала связи), из зарубежных — фирмы «Krupp» гидролокатор Atlas Fishing Sonar 950 (дискретное изменение частоты с одновременным изменением направления ДН). Система сканирования в режиме ЧМ-сигнала несколько усложняется. Однако, применение цифровой техники позволяет успешно решить возникающие при этом трудности. Метод излучения двух близких частот целесообразно применять в системах, использующих эффект нелинейной акустики (см. § 7.8 и 11.3).

В современной РПА все большее применение находят ТИ с автоматической компенсацией эффекта Доплера за счет собственной скорости судна в зависимости от направления излучения и курса судна. Данный способ излучения зондирующих импульсов, используемый в отечественном гидролокаторе «Таймень», позволяет сузить полосу пропускания приемных трактов, тем самым увеличить соотношение сигнал/помеха, а, следовательно, и дальность обнаружения РПА.

В последнее время становится актуальным вопрос управления поведением рыб. Поэтому большое внимание уделяется исследованию методов излучения сигналов, подобных сигналам биологических промысловых объектов. Основными техническими требованиями к таким сигналам являются: широкополосность (частота излучения импульсов должна быть достаточно низкой и изменяться плавно или дискретно); увеличенная интенсивность излучаемой мощности; плавное регулирование излучаемой мощности.

Сделаны первые попытки создания промышленных образцов подобной аппаратуры, имеющие широкополосные ТИ с регулируемой мощностью. Наиболее характерными образцами такой аппаратуры является: отечественная — «Биозвук», зарубежная — фирмы «Figuro» типа FS-12, новозеландская аппаратура Acustolure. В дальнейшем использование в аппаратуре ТИ с электронно-сканирующими системами, работающих со сложным сигналом или обладающих направленным действием при излучении НЧ-сигналов, например, основанных на эффектах нелинейной акустики, открывают новые возможности в изучении и управлении поведением рыб.

Конструктивно обособленную часть ТИ, обеспечивающую формирование мощного электрического импульса, называют генераторным устройством (ГУ). Основными узлами ГУ являются УМ, сканирующие устройства или, как их часто в последнее время называют, диаграммно-формирующие устройства (ДФУ) и ЗГ. Рассмотрим подробнее каждый узел.

§ 11.2. Усилители мощности

В ГУ современной РПА наиболее распространенными и перспективными являются следующие варианты построения УМ: транзисторные УМ, работающие в режиме класса В; транзистор-

ные УМ, работающие в режиме переключения (класса Д); УМ на основе тиристорных инверторов.

Транзисторные УМ обычно используют при небольших выходных мощностях ГУ. Как правило УМ в РПА строятся по трансформаторной схеме с несимметричным выходом (полумостовая схема) (рис. 11.2), имеющей следующие преимущества перед трансформаторной схемой с симметричным выходом:

- полное отсутствие подмагничивания сердечника выходного трансформатора, что уменьшает его габариты;
- отсутствие средней точки в первичной обмотке трансформатора, что упрощает конструкцию, уменьшает габариты и по-

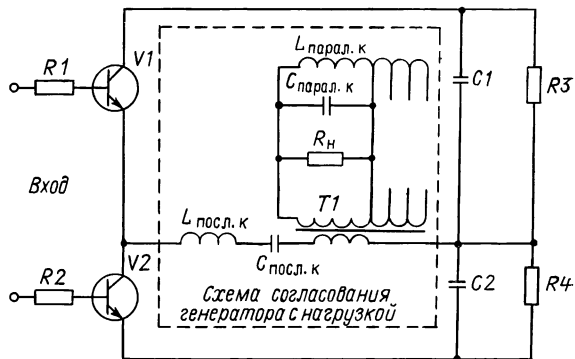


Рис. 11.2. Схема усилителя мощности на транзисторах.

вышает коэффициент использования выходного трансформатора;

- более полное использование трансформаторов по напряжению питания, что увеличивает КПД как источника питания, так и ГУ в целом;

- упрощается включение схемы фильтрующего контура в первичную обмотку выходного трансформатора;

- отсутствуют перенапряжения за счет индуктивности рассеяния первичной обмотки выходного трансформатора.

Транзисторные УМ, работающие в режиме класса В, находятся в энергетически более выгодном режиме, чем работающие в режимах классов А и АВ. В режиме класса В транзисторы работают поочередно по полпериода. Мощность, рассеиваемая на коллекторе транзистора, составляет лишь $(0,25—0,3) P_L$, тогда как в режиме класса А она превышает в 3—5 раз колебательную мощность P_L . Таким образом, в режиме класса В при одной и той же допустимой мощности рассеяния от одного транзистора можно получить в 5 раз большую полезную мощность, чем в режиме класса А. Такие УМ могут работать практически почти одинаково как при активной, так и при реактивной нагрузках.

Практика проектирования РПА показала, что описанный вариант построения УМ на транзисторах пригоден для создания лишь маломощных УМ (от 3 Вт до 100 Вт), где нет особых требований к энергетическому режиму транзисторов. Частотный диапа-

зон таких УМ определяется выбором типа транзистора. По подобной схеме построены ГУ системы СКОЛ и РПА «Пескарь».

Однако до настоящего времени схемы УМ, работающие в режиме класса В мало пригодны для использования на больших мощностях из-за отсутствия достаточно мощных транзисторов. Применение же имеющихся транзисторов (КТ809А и т. п.) приводит к значительному усложнению схем, так как в каждом плече моста необходимо ставить такое количество параллельно соединенных транзисторов, которое обеспечит необходимую выходную мощность. Например, расчет показывает, что для каждого плеча УМ, имеющего в нагрузке мощность $P_n = 1000$ Вт, необходимо устанавливать 12 параллельно соединенных транзисторов в каждом плече. Но такое количество транзисторов неизбежно влечет за собой снижение показателей надежности. УМ, работающие в режиме класса В, при большой выходной мощности имеют слишком громоздкие схемы и очень низкие показатели надежности. Поэтому для ГУ с мощностью выше 250 Вт их применение нецелесообразно.

Самым экономичным в энергетическом отношении для усилителей большой мощности является ключевой режим транзисторов (режим класса Д). В этом режиме потери энергии в усилительном элементе минимальны, вследствие чего КПД ГУ достаточно высок. Ключевой режим используется для усиления прямоугольных импульсов, поэтому входной сигнал должен иметь прямоугольную форму.

Транзисторные УМ, работающие в ключевом режиме, очень чувствительны к характеру нагрузки: при реактивной нагрузке ток через транзисторы возрастает по сравнению с током при активной нагрузке, и на транзисторах в момент переключения выделяется достаточно большая мощность. При большой мощности неприемлемо параллельное соединение транзисторов. Они имеют по времени включения большой разброс, подлежащий выравниванию, вследствие чего в какой-то момент времени вся мощность будет рассеиваться лишь на одном транзисторе с максимальным временем выключения, что приведет к выходу его из строя. Такие УМ целесообразно применять для ГУ, работающих в диапазоне частот от 30 до 200 кГц и имеющих выходную мощность до 2 кВт. По такому принципу построены УМ генераторных устройств РПА «Сарган» (высокочастотные тракты), «Финвал», «Пикша», «Угорь».

Однако для усиления ЧМ-сигналов такие УМ непригодны, так как из-за рассогласования нагрузки при отклонении от резонансной частоты КПД ГУ снижается из-за появления реактивной составляющей, а наращивание мощности путем увеличения числа транзисторов приводит к резкому снижению надежности. В настоящее время отечественной промышленностью начат выпуск мощных силовых кремниевых транзисторов типа ТК, рассчитанных на токи от 25 до 100 А при напряжении коллектор-эмиттер до 400 В. По своим параметрам они приемлемы для построения транзистор-

ных усилителей большой мощности. Эти транзисторы можно также использовать для построения ГУ, работающих в режиме ЧМ-сигнала.

Тиристорные УМ, чаще именуемые инверторами [6], широко используются в современной РПА. Основными элементами указанных УМ являются тиристоры (или кремниевые управляемые вентили). Последние являются самыми мощными полупроводниковыми приборами. Их коэффициент управления K_y (отношение мощности в нагрузке при включенном тиристоре к мощности сигнала управления) чрезвычайно велик: он достигает 10^4 — 10^5 , значительно превышая аналогичный показатель для других силовых приборов. Одной из основных особенностей тиристора является наличие на его вольт-амперной характеристике участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением и, как следствие,— работа в режиме переключения. К другим достоинствам тиристоров относятся: высокие значения параметров напряжения переключения $U_{пер}$ (до 1200 В) и номинального прямого тока $I_{пр}$ (до 1000 А), малое прямое падение напряжения $\Delta U_{пр}$ (меньше 1 В), высокое быстродействие (время включения $t_{вкл}$ и время выключения $t_{выкл}$ составляют десятки микросекунд), высокий КПД (до 0,98), сравнительно незначительные габариты и масса.

Тиристорные УМ, как правило, применяются в ГУ при рабочих частотах РПА ниже 30—35 кГц и при больших мощностях излучения. В зависимости от задач, выполняемых ГУ, и их схемных решений УМ на тиристорах подразделяют на [6]: однотактные, выполняемые на одном тиристоре; двухтактные, включающие в себя минимум два тиристора; многотактные. Они в свою очередь в зависимости от способа включения нагрузки подразделяются на параллельные, последовательные и параллельно-последовательные инверторы с обратными диодами и без них.

Одной из самых распространенных схем тиристорного УМ в РПА является параллельно-последовательный инвертор с диодами обратного тока, с удвоением частоты [6], принципиальная схема которого приведена на рис. 11.3. Эта схема, используемая в комплексах «Прибой-101» и «Сарган», имеет высокий уровень надежности и позволяет работать в диапазоне нагрузок от номинальной до коротко замкнутой при практически неизменном режиме работы ее основных элементов, что особенно важно при использовании УМ в режиме ЧМ-сигнала.

Тиристоры $V1$, $V2$ и подключенные встречно-параллельно им диоды $V3$, $V4$ образуют два плеча полумостовой схемы. Цепь от-

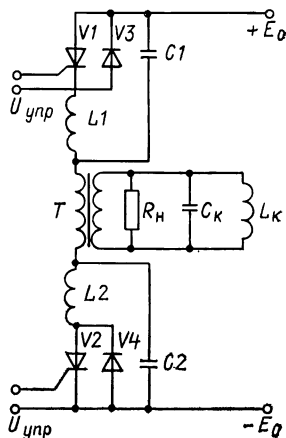


Рис. 11.3. Схема параллельно - последовательного инвертора.

крытого тиристора представляет собой колебательный контур, ток в котором изменяется по синусоидальному закону. При включении тиристора $V1$ в контуре, состоящем из индуктивности $L1$, емкости $C1$ и нагрузки R_n , подключенной через емкость $C2$ и источник питания параллельно емкости $C1$, образуются затухающие колебания. Через диод $V3$, включенный встречно-параллельно тиристор $V1$, происходит частичный возврат энергии в источник питания. При включении тиристора $V2$ возникает аналогичный переходной процесс, в котором участвует и энергия, накопленная в реактивных элементах в течение первого периода. В третьем полупериоде переходный процесс определяется напряжением питания и энергией, накопленной в реактивных элементах за предыдущее время колебательного процесса. Время установления динамического равновесия определяется параметрами контура.

Точный аналитический расчет тиристорных инверторов довольно сложен и требует применения специальных графических зависимостей и вычислительных машин [6]. На практике при расчете пользуются нижеприведенными эмпирическими формулами, разработанными на основании опыта проектирования РПА и позволяющими получать результаты, весьма близкие к практическим. Расчет начинают с выбора типа тиристор $V1$ и $V2$, исходя из схемного времени выключения, составляющего половину периода рабочей частоты. При этом класс тиристор по напряжению должен быть достаточно высоким, чтобы обеспечить допустимые анодные токи. Величина напряжения источника питания E определяется из условия допустимого анодного напряжения тиристора

$$E = 0,62U_{\text{адоп}}. \quad (11.3)$$

Приведенное сопротивление R'_n нагрузки инвертора

$$R'_n = 6E^2 \eta_{\text{тр}} [(Q_L - 2,82)/Q_L]^2 / \pi^2 p_n, \quad (11.4)$$

где $\eta_{\text{тр}}$ — КПД выходного трансформатора T ; Q_L — добротность контурной катушки индуктивности L_k ; P_n — мощность в нагрузке, Вт.

Оценивается величина контурной индуктивности L_k

$$L_k = R'_n \cdot 10^6 / 22,4f, \quad (11.5)$$

где f — резонансная частота инвертора, Гц, и величина контурной емкости

$$C_k = 10^6 / 2,85R'_n f. \quad (11.6)$$

Затем вычисляются амплитуда анодного тока тиристора I_a

$$I_a = 3,83E/R'_n \quad (11.7)$$

и амплитуда напряжения U'_n на первичной обмотке выходного трансформатора

$$U'_n = 0,84E. \quad (11.8)$$

Величина тока I_q через диоды обратного тока $V3$ и $V4$ определяется из соотношения

$$I_q = I_a/3. \quad (11.9)$$

Диоды выбираются по допустимой величине обратного напряжения и величине тока. Параметры контура нагрузки C_K и L_K определяются из допустимого переходного процесса в момент начала и конца радиопульса. Допустимое количество колебаний переходного процесса $n_{\text{доп}}$ равно

$$n_{\text{доп}} = 0,1n, \quad (11.10)$$

где n — полное количество колебаний в радиопульсе. Допустимая добротность $Q_{\text{доп}}$ наружного контура определяется

$$Q_{\text{доп}} \leq 0,685n_{\text{доп}}. \quad (11.11)$$

КПД параллельного контура равен

$$\eta_{\text{пар.к}} = (Q_K - Q_{\text{доп}})/Q_K, \quad (11.12)$$

где Q_K — добротность катушки индуктивности параллельного контура.

При работе тиристорных инверторов в РПА иногда возникают аварийные режимы, причины которых можно разделить на две группы [6]: внешние, вызванные короткими замыканиями или обрывами в нагрузке, и внутренние, обусловленные выходом из строя отдельных тиристоров и диодов или нарушениями в работе схем формирования управляющих импульсов. Тиристоры и диоды, используемые в ГУ, очень чувствительны к перегрузкам по току и к перенапряжению. Для надежной работы тиристорных ГУ необходимо использовать специальные устройства защиты. Плавкие предохранители и автоматические выключатели, являющиеся наиболее простыми защитными устройствами, но обладающие слишком большим временем срабатывания, в данных устройствах не пригодны. Добиться требуемого высокого быстродействия защиты можно лишь при наличии быстродействующих бесконтактных электронных схем защиты. Одна из таких схем, наиболее часто встречающаяся в практических разработках ГУ, представлена на рис. 11.4. При превышении напряжения на индуктивности $L1$, на делителе $R2, R3$ также возникает превышающее допустимое напряжение, которое прожигает стабилитрон $V3$. Пик резко нарастающего напряжения передается через трансформатор $T2$ и открывает маломощный тиристор $V2$, через который низковольтное напряжение питания ГУ плюс 27 В и сигнал управления тиристором $V5$ замыкаются на корпус. Тиристорный инвертор в течение четверти периода рабочей частоты перестает работать. Для введения инвертора в рабочее состояние достаточно произвести выключение-включение питающих цепей ГУ, т. е. тиристор $V2$ привести

в выключенное состояние, если в данном случае отсутствует постоянное выведение из строя схемы инвертора.

Необходимо заметить, что нередко специалисты по эксплуатации РПА не обращают внимания на рабочее состояние схем за-

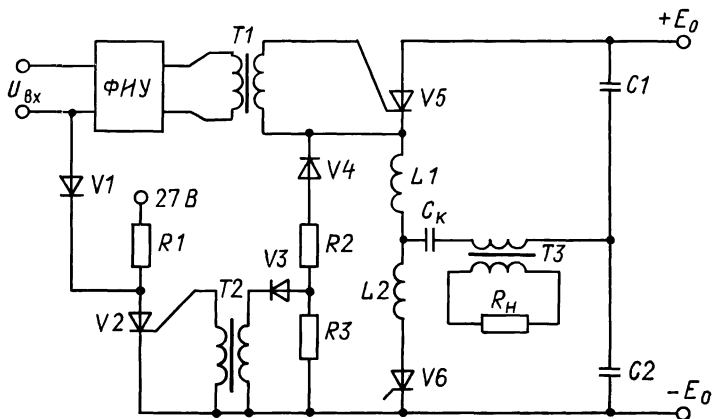


Рис. 11.4. Схема электронной защиты усилителей мощности.

щиты. Указанные схемы защиты не имеют внешней сигнализации об их работоспособности. Неисправное состояние последних приводит к повышенной интенсивности выхода из строя тиристоров ГУ.

§ 11.3. Тракты излучения параметрических приборов

ТИ параметрических гидроакустических приборов имеют некоторые особенности по сравнению с традиционными, что связано с физическими закономерностями возникновения ВРЧ в ПА (см. § 2.8 и 7.8). Частоты накачки в ПА обычно во много раз превышают частоты ВРЧ. Поэтому при конструировании параметрической РПА используют сравнительно высокочастотные ТИ.

Сигналы накачки ПА (см. рис. 2.8) генерируются в электронных блоках формирования сигналов, к которым предъявляются следующие требования:

- минимальные нелинейные искажения;
- стабильность частоты ЗГ не ниже 10^{-6} ;
- равномерность АЧХ в диапазоне перестройки;
- обеспечение достаточной мощности в полосе частот при повышенной временной стабильности;
- работа в импульсном режиме (или с модуляцией);
- наличие режекторных фильтров, обеспечивающих подавление на 40—50 дБ сигнала с частотами ВРЧ, который мог бы образоваться в электронных трактах;
- обеспечение условий согласования электронной схемы с преобразователями накачки;

— сигналы накачки должны быть фазосвязанными.

Для ПА в режиме самодетектирования указанные требования обычно смягчаются.

В параметрической РПА, в зависимости от ее назначения, формирование электрических сигналов накачки производится одноканальной или двухканальной схемой. В одноканальной схеме формирования сигналов накачки используются амплитудно-модулированные колебания (АМК), двухполосные сигналы с подавленной несущей (DSB) и биения колебаний двух генераторов. По одноканальной схеме формирования сигнала накачки работает и режим самодетектирования ПА (амплитудная манипуляция). В двухканальных схемах формирования используются два отдель-

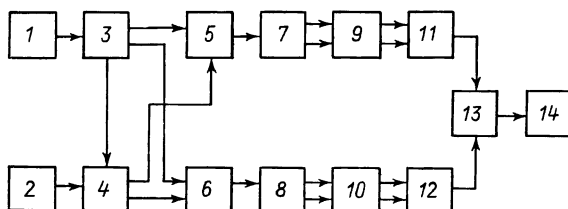


Рис. 11.5. Структурная схема тракта РПИ рыбопоискового прибора «Пескарь».

ных моночастотных ГУ или один моночастотный, а второй — генератор сложных сигналов (ЧМК, ЛЧМК и др.).

При создании ТИ мощного параметрического гидролокатора, когда требуется получить возможно больший уровень звукового давления на фиксированной разностной частоте (или в сравнительно узком диапазоне), целесообразно использовать двухканальный метод формирования и двухрезонансный преобразователь накачки (как, например, в ПГЛ-2, ПГЛ-5 и ПГЛ-5М). В широкополосных гидролокаторах чаще целесообразнее применять метод биений или двухполосной модуляции, а также режим самодетектирования. В низкочастотных ПА [24] требуются специальные многочастотные методы синтеза сигнала накачки.

ТИ рыбопоискового прибора «Пескарь» в параметрическом режиме построен по одноканальной схеме с использованием биений двух частот [32], структурная схема которого изображена на рис. 11.5. Задающий генератор 1 вырабатывает непрерывные синусоидальные колебания частотой 3 МГц, поступающие на усилитель-ограничитель 3, с выхода которого прямоугольные импульсы подаются на счетные входы делителей частоты 5 и 6, управляемые схемой запуска 4. При делении 3Г соответственно на 12 и 10 образуются частоты накачки $f_1=250$ кГц и $f_2=300$ кГц. Схема 4 управляется импульсным генератором 2, где задается длительность посылок. Сигналы с делителей 5 и 6 поступают на инверторы 7 и 8, с которых снимается последовательность радиоимпульсов с прямоугольным заполнением, сдвинутых по фазе на 180° ,

подаваемая на каскады предварительного усиления *9* и *10*, собранные по двухтактной трансформаторной схеме. Со вторичных обмоток выходных трансформаторов радиоимпульсы поступают на входы оконечных усилителей *11* и *12*, собранных также по двухтактной схеме, с выходов которых радиоимпульсы поступают на схему *13* суммирования и согласования с нагрузкой. Далее сигнал в виде биений двух частот подается на преобразователь накачки

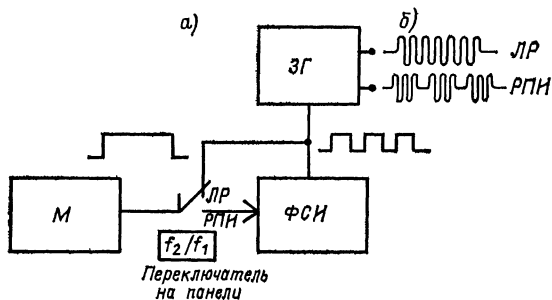


Рис. 11.6. Тракт РПИ эхолота «Сарган-ЭМ»: *а* — структурная схема; *б* — эпюры импульсов напряжения.

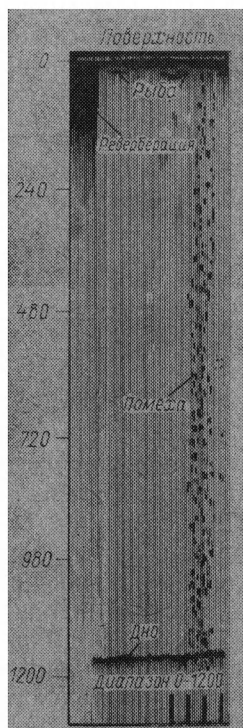


Рис. 11.7. Эхограмма записи рыбы и дна на глубине 1200 м в линейном режиме (*а*) и в РПИ (*б*) на участке Норвежского моря, произведенная эхолотом «Сарган-ЭМ».

14. Структурные схемы других параметрических приборов приведены в [60, 61].

В эхолоте «Сарган-ЭМ» используется [19, 21] режим параметрического излучения (РПИ), в котором реализуется ПА, работающая на принципе самодетектирования (см. § 7.8). Излучение сигналов происходит в штатном режиме комплекса в виде пачки импульсов с частотой заполнения $f_2=135$ кГц, а прием осуществляется имеющейся в комплексе антенной и приемным трактом на частоте $f_1=20$ кГц. Введение РПИ связано с минимальными переделками в ТИ эхолота. На рис. 11,6, *а* приведена структурная схема той части ТИ эхолота, которая реализует РПИ. В ГУ введен дополнительный субблок ФСИ (формирователь серии импульсов) в разрыв между существовавшими субблоками М и ЗГ. Введение субблока ФСИ позволяет формировать излучение серии импульсов

в пределах одной посылки с частотой заполнения $f_2 = 135$ кГц. На рис. 11.6.б показаны эпюры импульсов напряжений в соответствующих точках ТИ в линейном режиме (ЛР) и в РПИ. Длительность импульсов ФСИ и частота их следования в пределах одной посылки подобраны таким образом, чтобы спектральная составляющая самодетектированного сигнала на частоте приемного тракта $f_1 = 20$ кГц была максимальна (см. численный расчет примера в § 7.8).

Введение РПИ позволило получить в эхолоте «Сарган-ЭМ» дополнительные положительные качества, о которых говорилось в § 2.7 и 7.8. Для иллюстрации на рис. 11.7 б приведена эхограмма в РПИ приповерхностной рыбы и профиля дна в Норвежском море на глубине 1200 м, на рис. 11.7, а показана синхронно записанная эхограмма в обычном ЛР (излучение и прием на частоте $f_2 = 135$ кГц). Анализ эхограмм показывает, что в ЛР реверберационная помеха не позволила зарегистрировать отражения от дна и рыбы, а РПИ в силу безлепетковости ПА регистрирует в тех же условиях без реверберации и рыбу и дно.

§ 11.4. Диаграммо-формирующие устройства

Диаграммо-формирующие устройства (ДФУ) предназначены для формирования ДН в определенном направлении при наличии в ТИ фазированных антенных решеток.

В РПА используются аналоговые и цифро-аналоговые ДФУ. В обоих вариантах принят наиболее прогрессивный способ управления ДН по входам УМ, возбуждающих независимые каналы АС, в ДФУ число выходов совпадает с числом независимых входов АС или кратно определенному числу (так для цилиндрических АС часто кратно числу 3).

Задачей ДФУ является распределение фаз по элементам антенны таким образом, чтобы колебания складывались с одинаковой фазой не только в направлении $\theta = 0^\circ$, а и в заданных других направлениях, называемых направлениями компенсаций [64]. По этим направлениям ориентируется максимум основного лепестка.

Наиболее распространенными аналоговыми ДФУ являются следующие: дискретный набор статических линий задержек (ЛЗ) с коммутируемыми отводами; управляемые напряжением фазовращатели; управляемые напряжением мультивибраторы, образующие ЛЗ.

Первый из перечисленных вариантов представляет собой набор искусственных ЛЗ, например, из индуктивностей и емкостей. В каждый момент времени измерения отводы одной из ЛЗ через соответствующие УМ соединены с преобразователями антенны так, как показано на рис. 11.8.

Параметры элементов ЛЗ подбираются так, чтобы между соседними преобразователями антенны существовала одинаковая и вполне определенная задержка сигнала. Показанное на рис. 11.8 соединение существует во времени на протяжении длительности

излучаемого импульса в заданном направлении, после чего система ключей (на рис. 11.8 не показана) соединяет входы УМ с соответствующими выходами другой ЛЗ, в связи с чем формируется ДН нового направления излучения. Так, в работу подключаются все ЛЗ необходимого набора. Поскольку в принципе пассивные ЛЗ создают задержку сигнала, независимую от частоты, данные устройства могут обеспечивать сканирование звукового луча, частота которого изменяется во времени по заданному закону. Однако, практически это справедливо для относительно небольшой девиации частоты.

Особенностью построения описанных ДФУ является то обстоятельство, что время задержки сигнала любого номера канала от-

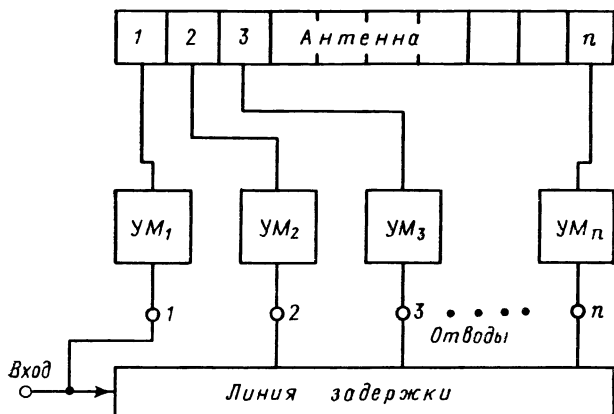


Рис. 11.8. Структурная схема ДФУ с набором статических ЛЗ.

носителю предыдущего не должно превышать длительности периода рабочей частоты. Переход ДН из одного полусектора сканирования в другой происходит только тогда, когда зеркально изменяется порядок соединения преобразователей АС и отводов ЛЗ. В эксплуатации описанные ДФУ (например, в отечественном гидролокаторе «Финвал») зарекомендовали себя с положительной стороны. Однако необходимо отметить технологические трудности при их изготовлении и регулировке — громоздкость, малую универсальность и низкий уровень унификации.

Вариант ДФУ с управляемыми фазовращателями основан на использовании свойств варисторов или варикапов изменять свои параметры (сопротивление или емкость) в зависимости от протекающего через них управляющего тока или приложенного напряжения. Эти элементы включаются в схему фазовращателя. Количество таких фазовращателей соответствует числу независимых преобразователей АС. С выхода одного фазовращателя сигнал поступает на вход другого и т. д., а все вместе фазовращатели образуют схему, подобную описанной выше. Если одновременно на всех варисторах или варикапах изменять напряжение, то фазовый

сдвиг между сигналами соседних отводов фазовращательной линии, а следовательно, и между соседними преобразователями АС будет синхронно и в принципе одинаково изменяться. Выбор того или иного вида схемы зависит в основном от тех величин фазовых сдвигов, которые требуется обеспечить. Единственное неперменное требование к схеме фазовращателя в системе сканирования сложного сигнала — по возможности минимальная зависимость времени задержки фазовращателя от частоты и отсутствие в пределах одного фазовращателя статического фазового сдвига в 360° . Реализация данного варианта более компактна и позволяет вращать ДН плавно, а не скачками, как в предыдущем случае. Закон вращения ДН во времени теоретически реализуется любой. Существенными недостатками его являются очевидная нелинейность зависимости фазового сдвига на выходе любой из фазовращающих ячеек от управляющего напряжения и невысокая стабильность параметров при воздействии на аппаратуру перепадов температуры. Кроме того, время задержки одной фазовращающей ячейки сложным образом зависит от частоты сигнала. Поэтому использование данного варианта в аппаратуре со сложным сигналом возможно только при очень небольшом диапазоне изменения частоты либо при применении сложной системы управления, корректирующей указанную нелинейность. Точность установки и поддержания фазовых соотношений на выходе такой системы, как показывает опыт, невелика.

Наиболее прогрессивным является вариант построения ДФУ с применением управляемых электронным способом мультивибраторов задержки. Каждый такой мультивибратор запускается импульсом удвоенной рабочей частоты и вырабатывает импульс, длительность которого задается величиной управляющего напряжения. Задний фронт импульса задержан относительно импульса запуска на величину принятой длительности. Триггер, запускаемый задним фронтом этого импульса, восстанавливает рабочую частоту. Когда такие мультивибраторы запускают последовательно друг друга, образуется ЛЗ, на выходах которой (на упомянутых триггерах) вырабатываются сигналы рабочей частоты, имеющие одинаковую задержку относительно друг друга, если управляющее напряжение на всех мультивибраторах одинаково. Далее эти сигналы возбуждают АС так же, как и в предыдущих вариантах. Время задержки любой ячейки описанной линии не зависит от частоты сигнала и нетрудно подобрать такую схему мультивибратора, у которой время задержки связано с управляющим напряжением линейной зависимостью. Таким образом, данная схема в принципе с высокой точностью может работать при любом законе частотной модуляции и любом законе сканирования рабочего сектора. Единственным недостатком является то, что при времени задержки, меньшем, чем время восстановления каждого мультивибратора, работа схемы становится неустойчивой.

В настоящее время существует развитое поколение многофункциональных микроЭВМ, отличающихся высокой надежностью и малой стоимостью, которые способны реализовать задачу элек-

тронного сканирования ДН. Однако в настоящее время при разработке ДФУ и ЗГ целесообразно ориентироваться на использование цифровых ЛЗ, каждая ячейка которых представляет собой двоичный счетчик — триггерный делитель некоторой высокой (тактирующей) частоты с периодом T_T . Ячейка, запускаемая импульсами удвоенной рабочей частоты, отсчитывает определенное количество периодов T_T и возвращается в исходное состояние при приходе всех триггеров двоичного счетчика в заранее заданное состояние. При этом генерируется импульс, подобный импульсу запуска, но задержанный относительно последнего на время τ_3 . Импульсы с выхода каждой ячейки являются запускающими для по-

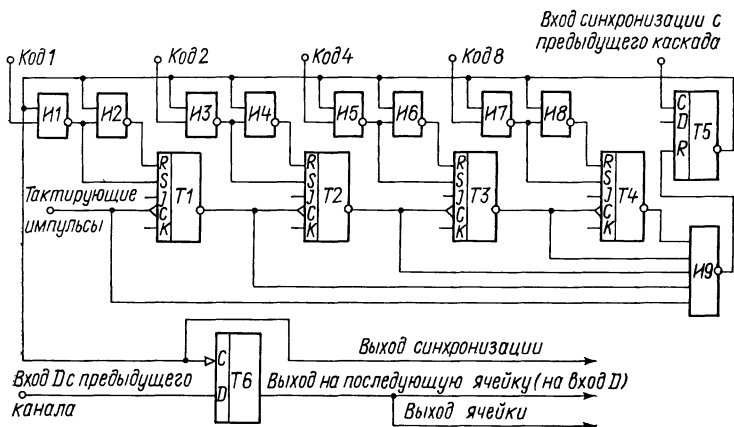


Рис. 11.9. Структурная схема ячейки задержки со счетчиком на четыре разряда.

следующей ячейки этой ЛЗ. Кроме того, эти же импульсы подаются на специальные триггеры, которые вырабатывают сигналы рабочей частоты, необходимые для возбуждения соответствующих каналов УМ.

Время задержки импульсов на выходе ячеек относительно входных, а, следовательно, и время задержки сигналов рабочей частоты между двумя соседними отводами ЛЗ определяется соотношением

$$\tau_3 = 2^n T_T, \quad (11.13)$$

где n — число двоичных разрядов счетчика. Из этого соотношения следует, что управлять временем задержки можно путем изменения T_T , т. е. оперативным изменением числа участвующих в делении тактирующей частоты разрядов двоичного счетчика.

На рис. 11.9 приведена упрощенная схема ячейки задержки со счетчиком на четыре разряда, используемая в комплексах «Таймень». В исходном состоянии на инверсном выходе \bar{Q} Д-триггера $T5$ имеется потенциал, который с помощью схем записи $И1-И8$ обеспечивает установление и удержание на выходах триггеров $T1-$

T_4 кода задержки, поданного на шины «Код 1» — «Код 8». С приходом на вход C перепада 0—1 триггер T_5 срабатывает, что позволяет триггерам T_1 — T_4 реагировать на импульсы высокой частоты, приходящие на их входы синхронизации. Когда на вход C триггера T_1 поступит такое число тактирующих выходов счетных триггеров (на рис. 11.9 они не показаны), то на инверсных выходах этих триггеров установятся единичные потенциалы. Схема совпадения $И9$ срабатывает и ее выходной потенциал вернет триггер T_5 в исходное состояние. При этом перепад 0—1 на его выходе запустит триггер T_6 , который установится в такое состояние, какой потенциал в этот момент присутствует на его входе D . Этот же перепад является запускающим для триггера, аналогичного T_5 , в следующей ячейке задержки. Напряжение с выхода триггера T_6 подается на вход D аналогичного триггера следующей ячейки, тогда как указанный потенциал входа D триггера T_6 снимается с выхода аналогичного триггера предыдущей ячейки. Таким образом, выходной сигнал ячейки оказывается задержанным относительно сигнала предыдущей ячейки на время заполнения всех триггеров счетчика. Количество таких ячеек в ЛЗ определяется количеством независимых каналов ТИ. Подключение выходов ячеек цифровой ЛЗ к входам УМ (и далее к каналам АС) осуществляется через систему ключей (на рис. 11.9 также не показаны). В качестве тактирующей частоты используется непосредственно сигнал высокой частоты, а код задержки с преобразователя кодов подается непосредственно на соответствующие шины счетчиков.

Цифровые варианты построения ДФУ обладают наибольшей универсальностью: при их применении в устройствах со значительно отличающимися частотами, длительностями излучения, девиацией частоты при работе с частотно-модулированным сигналом достаточно изменять только устройства управления или кодирования. Такая универсальность обуславливает высокую степень унификации однотипных блоков в различных изделиях. Кроме того, цифровые ЛЗ легко могут быть приспособлены к схеме цифровой обработки сигналов в режиме приема.

При проектировании РПА выбор любого из описанных вариантов не может быть предсказан заранее, а должен быть поставлен в зависимости от конкретных условий разработки и ее назначения.

§ 11.5. Задающие генераторы

Задающие генераторы (ЗГ) предназначены для формирования высокостабильных колебаний ультразвуковой частоты. ЗГ ранних разработок РПА представляли собой генераторы, собранные обычно по схеме емкостной трехточки. Такие ЗГ обладают довольно низкой стабильностью частоты. В дальнейшем их сменили кварцованные мультивибраторы, работающие на частоте, значительно выше рабочей частоты РПА с последующим ее делением. Однако в таких ЗГ невозможно получить требуемую в современных раз-

работках аппаратуры частотную модуляцию. Наиболее перспективными являются ЗГ с автоматической подстройкой частоты, которая задается двоичным кодом, поскольку традиционные схемы на одну (или две) фиксированную частоту никаких затруднений в реализации не представляют.

На рис. 11.10 представлена схема ЗГ, выполненная на основе преобразования напряжения в частоту, что позволяет получить изменение частоты практически по любому закону. Она состоит из следующих основных узлов: сумматора, суммирующего входной сигнал с опорным; инвертора, изменяющего полярность суммарного

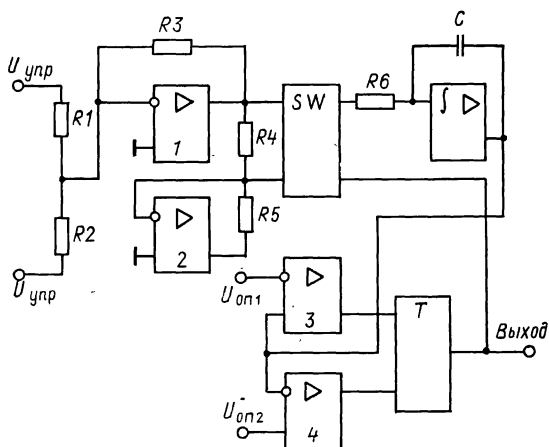


Рис. 11.10. Структурная схема ЗГ на основе преобразования напряжения в частоту.

сигнала; коммутатора, подключающего поочередно ко входу интегратора либо выход сумматора, либо инвертора; интегратора, предназначенного для получения линейного преобразования; двух компараторов с выходным триггером.

Недостатком такой схемы является низкая температурная стабильность частоты, определяемая в основном частотными свойствами коммутатора и компаратора. Причем эта нестабильность понижается с повышением частоты. Так, уже на 20 кГц уход частоты достигает 1 %.

Схема ЗГ, приведенная на рис. 11.11, отличается от рассмотренной тем, что коммутатор управляется не рабочей частотой, а кодом частоты. Данная схема позволяет поднять верхний предел генерируемых частот до 50 кГц при температурной нестабильности до 1 %. Однако для данной схемы закон изменения частоты не может быть произвольным из-за ограничения кодового управления.

Схемы ЗГ, представленные на рис. 11.12 — с автоподстройкой частоты — обеспечивают высокую температурную стабильность, что дает значительные преимущества перед рассмотренными схемами, несмотря на некоторое усложнение схемных решений. Однако схема ЗГ, приведенная на рис. 11.12а не позволяет иметь

произвольный характер изменения частоты. Она применима только для ЗГ с линейно-изменяющейся частотой, так как делитель с переменным коэффициентом деления (ДПКД) управляется также кодом. ЗГ (рис. 11.12б) является наиболее удачным для получения сигнала с произвольным законом изменения частоты.

Перспективными для решения большинства современных задач являются схемы ЗГ, в которых роль генератора высокой частоты

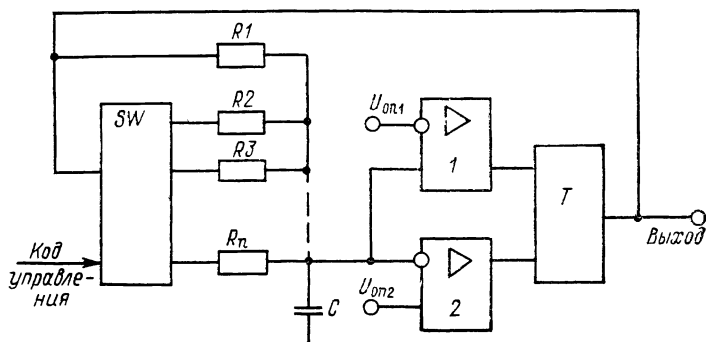


Рис. 11.11. Структурная схема ЗГ, управляемая кодом частоты.

выполняет стабилизированный высокочастотным кварцевым резонатором релаксатор из элементов счетной техники, а счетчик-делитель построен по принципам, отраженным на рис. 11.9, только вход синхронизации триггера $T5$ следует объединить со входом тактирующих импульсов (от упомянутого релаксатора), а триггер $T6$

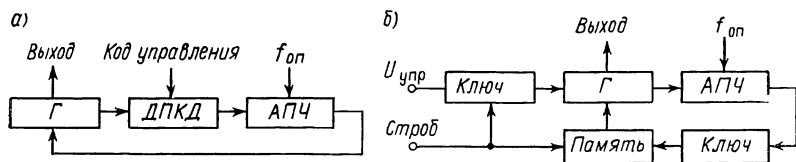


Рис. 11.12. Структурные схемы ЗГ с автоподстройкой частоты.

следует превратить в счетный (например, соединив его вход D с инверсным выходом). Такой ЗГ при неизменяемом коде деления на кодовых шинах выдает на выходе тональный сигнал (меандр) частотой $F = f_T K_d$, где f_T — частота высокочастотного генератора (тактирующая); K_d — целочисленный коэффициент деления, величина которого заводится на кодовые шины. Если же код деления изменяется, например, на единицу после каждого цикла деления высокой частоты, то на выходе получается частотно-модулированный сигнал, в котором информация об изменении частоты содержится в моментах существования фазы колебания 0 и 180° . Вид

частотно-временной характеристики однозначно определяется законом изменения кода и может быть запрограммирован в общем случае любым, но с конечными величинами отклонения от идеализированной зависимости.

Глава 12

ПЕРВИЧНАЯ ОБРАБОТКА ЭХОСИГНАЛОВ

§ 12.1. Аналоговые системы пространственно-временной обработки эхосигналов

Целью первичной обработки эхосигналов в РПА является обнаружение и разрешение объектов поиска как во времени, так и в пространстве. Так как эхосигнал всегда принимается на фоне шумов и помех, то эта задача решается на основе [58, 106] согласованной двумерной фильтрации. Сигнал, отраженный от объекта поиска, находящегося в дальней зоне, представляют в виде смеси сигнала $S(t, \alpha)$ и помехи $\bar{n}(t, \alpha)$

$$\bar{x}(t, \alpha) = \bar{s}(t, \alpha) + \bar{n}(t, \alpha), \quad (12.1)$$

где t — текущее время; α — пространственный параметр. В этом случае, например, для линейной эквидистантной АС двумерная фильтрация заключается в выполнении обработки входной реализации по алгоритму

$$\bar{y}(t, \alpha_k) = \int_{-T/2}^{T/2} \sum_{m=0}^{M-1} \bar{x}_m^*(\tau, \alpha) \bar{s}_m(t - \tau, \alpha_k) d\tau, \quad (12.2)$$

где T — интервал усреднения; $m=0, M-1$ — номер элемента АС; M — число элементов дискретной АС; τ — время запаздывания прихода сигнала; α_k — пространственный множитель определения направления прихода сигнала; знак * означает комплексное сопряжение. Алгоритм (12.2) фактически определяет двумерную свертку входной реализации с точной копией излученного сигнала в направлении α_k . В РПА используются сигналы, спектр которых $F_c \ll f_0$ — несущей частоты. В этом случае двумерная фильтрация разделяема на пространственную и временную. В современной РПА перспективным является использование многоэлементных АС с формированием многолучевой ДН. На рис. 12.1 приведена структурная схема реализации алгоритма (12.2) для многоканальных аналоговых систем обработки с обратимой АС.

Основное назначение блока ПУ — согласование входа приемного тракта с выходом преобразователей АС и компенсация затуханий в блоке ДФУ. На ПУ не возлагаются функции полной согласованной фильтрации, так как узкополосные аналоговые

фильтры в многоканальных системах имеют значительный межканальный разброс амплитудных и фазочастотных характеристик. В связи с тем, что ПУ функционально стоят перед ДФУ, то их межканальная неидентичность ведет к значительному увеличению уровня бокового поля и расширению ДН. Поэтому ПУ практически имеют небольшой коэффициент усиления ($K = 100 \div 300$) и достаточно широкополосны. Полоса пропускания ПУ в $5 \div 10$ раз превышает ширину спектра сигнала, что позволяет на практике добиться достаточно высокой идентичности ПУ в многоканальных системах.

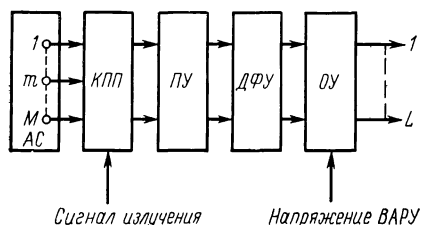


Рис. 12.1. Структурная схема аналоговой системы первичной обработки эхосигнала многолучевого гидролокатора.

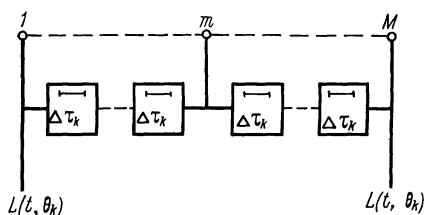


Рис. 12.2. Структурная схема ДФУ.

Блок ДФУ предназначен для формирования статического веера ДН с помощью задержки и суммирования [58, 76, 121]

$$\bar{L}(t, \theta_k) = (1/M) \sum_{m=0}^{M-1} \bar{x}_m(t - m \Delta\tau_k), \quad (12.3)$$

где θ_k — угол между нормалью к антенне и направлением формирования максимума ДН; $\Delta\tau_k = d \sin \theta_k / c$ — разность времени прихода сигнала на соседние элементы АС; d — расстояние между элементами. Структурная схема ДФУ, формирующего ДН в направлении θ_k , показана на рис. 12.2. ДФУ должно содержать $(M - 1)$ секций, время задержки каждой секции равно $\Delta\tau_k$. С помощью такой схемы формируются две симметричные ДН относительно нормали к АС. Изменяя величину задержки, можно сформировать ДН в различных направлениях. Однако на практике трудно точно подобрать межсекционную задержку, что приводит к ошибкам определения пеленга. Число элементов задержки определяется числом направлений ДН. Следовательно, ДФУ на пассивных ЛЗ не обладают универсальностью (см. § 11.4).

Окончательная временная обработка эхосигнала выполняется блоком ОУ, на который возложены следующие задачи: квазиоптимальная фильтрация, согласованная по длительности с принимаемым сигналом; стационаризация входного процесса.

Фильтрация сигнала может быть выполнена как во временной области, так и в частотной. Во временной области используются автокорреляторы или взаимокорреляторы

$$\bar{y}_a(t) = \int_{-T/2}^{T/2} \bar{x}^*(\tau) \bar{x}(t - \tau) d\tau; \quad (12.4)$$

$$\bar{y}_b(t) = \int_{-T/2}^{T/2} \bar{x}^*(\tau) \bar{s}(t - \tau) d\tau, \quad (12.5)$$

а в частотной — фильтры

$$\bar{Y}(j\omega) = \bar{X}(j\omega) \bar{H}^*(j\omega), \quad (12.6)$$

где \bar{X} — спектр сигнала; \bar{H}^* — частотная характеристика.

В аналоговых системах временной обработки в основном используются фильтры, полоса пропускания которых согласована с длительностью сигнала. Авто- и взаимокорреляционная обработка в РПА широкого применения не нашли из-за технической сложности их реализации и больших аппаратных затрат по сравнению с частотной, которая, кроме того, эффективна при больших длительностях $\tau_{\text{и}}$. Причем фильтрация согласно (12.5) и (12.6) дает идентичные результаты [17]. Квазиоптимальную фильтрацию смеси прямоугольного радиоимпульса длительностью $\tau_{\text{и}}$ и «белого» шума можно выполнить с помощью резонансных контуров. Если полоса пропускания одиночного контура $2\Delta f = 0,4/\tau_{\text{и}}$, то соотношение сигнал/шум на выходе фильтра равно $a = 0,9 q_{\text{онм}}$ [94], где $q = (2E/N_0)^{1/2}$ — соотношение сигнал/шум, достигаемое при использовании согласованного фильтра; E — энергия сигнала; N_0 — спектральная плотность шума. Для фильтра с гауссовской амплитудно-частотной характеристикой при $2\Delta f = 0,72/\tau_{\text{и}}$ соотношение сигнал/шум $a = 0,94 q_{\text{онм}}$. Поэтому в ОУ целесообразно использовать последовательное включение каскадов с одиночными резонансными контурами, что позволяет создать близкую к гауссовской по форме частотную характеристику при числе каскадов $n \geq 4$ [17]. Обычно такая возможность имеется, так как общий коэффициент усиления распределен по каскадно.

Теория оптимальной фильтрации базируется на предположении, что на вход системы воздействует стационарный случайный процесс. В гидролокации за счет реверберационной помехи принимаемая реализация всегда нестационарна. Для уменьшения влияния реверберации применяются устройства ВАРУ, с помощью которых по заданному закону, приближенно соответствующему процессу уменьшения реверберации во времени, изменяется коэффициент усиления ОУ. В аналоговых системах практически трудно построить адаптивную систему, учитывающую все законы изменения реверберации, и поэтому закон ВАРУ задается приближенно и постоянным. Закон ВАРУ в виде изменяющегося во вре-

мени напряжения поступает на ОУ и при перемножении с входным сигналом стационаризирует процесс во времени. Наилучшие результаты получаются при использовании в схемах ВАРУ умножителей. В ранее разработанной РПА для регулировки коэффициента усиления применялись управляемые делители на нелинейных элементах (комплексы «Прибой-101», «Сарган») или устройства с использованием широтноимпульсной модуляции (ШИМ) (гидролокатор «Угорь»). Введение нелинейности в каскады ОУ ухудшает их параметры, а ШИМ вносит дополнительные шумы по сравнению с линейной обработкой. Освоенные промышленностью микросхемы К140МА1 и К525ПС1 позволяют по-

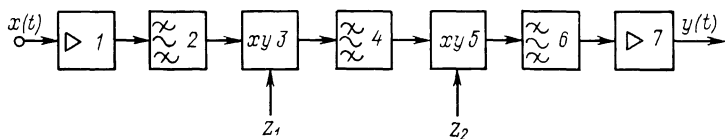


Рис. 12.3. Структурная схема основного усилителя.

лучить точный результат умножения и линейность в пределах до 40 дБ. Динамический диапазон входных сигналов в РПА составляет 100—120 дБ, выводимой же информации на индикаторы 20—40 дБ. Следовательно, глубина регулировки ВАРУ должна быть не менее 80 дБ, которую можно обеспечить с помощью двух умножителей типа К525ПС1. В этом случае структурная схема ОУ принимает вид (рис. 12.3) и состоит из входного буферного усилителя 1, нагрузкой которого является одиночный контур 2, резонансных контуров 4 и 6, настроенных на несущую частоту f_0 , стоящих после двух умножителей 3 и 5. На выходе ОУ ставится детектор и каскад с низкоомным выходом 7. На умножители 3 и 5 поступает изменяющееся во времени напряжение $z_1 = z_2 = \sqrt{U_{\text{ВАРУ}} + U_{\text{РУУ}}}$ (где $U_{\text{РУУ}}$ — напряжение ручной регулировки усиления). Такое покаскадное распределение регулировки позволяет получать линейность в пределах до 80 дБ.

§ 12.2. Аналоговые устройства цифровых систем первичной обработки и дискретизация сигналов

Так как в цифровых системах первичной обработки сигналов обязательным условием возможности дискретизации сигналов является ограничение спектра, которое может быть выполнено только аналоговыми фильтрами, то цифровой системе первичной обработки (СПО) всегда предшествует предварительная аналоговая обработка. На нее возлагаются следующие функции: ограничение спектра сигнала; усиление входного сигнала до уровня срабатывания аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и стационаризация входного процесса с помощью ВАРУ. В принципе ВАРУ можно осуществлять и в цифровой части приемного

тракта, но это требует большой разрядности АЦП (порядка 20 бит) и высоких скоростей обработки. Поэтому аналоговые предварительные усилители (АПУ) цифровых СПО отличаются от ПУ аналоговых СПО только операцией стационаризации, которая переносится из ОУ в блок АПУ, и увеличением коэффициента усиления.

Согласно теореме Котельникова сигнал с конечным спектром может быть представлен дискретными отсчетами, взятыми с частотой $f_g \geq 2F_c$, где F_c — верхняя частота спектра сигнала. Для сигналов конечной длительности, используемых на практике,

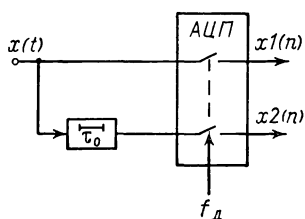


Рис. 12.4. Структурная схема дискретизатора 2-го порядка.

строго говоря, теорема Котельникова неприменима, так как частотный спектр конечных во времени сигналов теоретически бесконечен. Но, если после фильтрации подавление верхних спектральных составляющих сигнала превышает минус 40—50 дБ, то такое ограничение спектра считается для практики достаточным. Для наиболее используемых в РПА прямоугольных радиоимпульсов, имеющих огибающую спектра вида $\sin(\pi t/\tau_u)/(\pi t/\tau_u)$, 95 % энергии сигнала сосредоточено в главном лепестке спек-

тра, ограниченном по первым нулям в диапазоне частот $\Delta\omega = 2\pi/\tau_u$. Если пренебречь потерями энергии сигнала вследствие ограничения за главным лепестком спектра, то становится возможным и на практике применение теоремы Котельникова с использованием следующих методов дискретизации [70]: дискретизации аналитического сигнала; квадратурной дискретизации; дискретизации второго порядка.

Первые два вида дискретизации требуют существенного усложнения аналоговой части СПО за счет применения или преобразователя Гильберта, или комплексного демодулятора. Достоинством их является то, что становится возможной обработка сигнала по его комплексной огибающей и, как следствие, — низкая частота дискретизации и быстроедействие процессоров обработки. Технически наиболее просто реализовать дискретизацию второго порядка. Сигнал разделяется на два канала, в один из которых вводится задержка на некоторое время τ_0 (рис. 12.4). Далее осуществляется синхронная дискретизация в обоих каналах. В этом случае частота дискретизации довольно высока $f_d \geq 2(f_0 + F_c/2)$.

Цифровые же способы обработки сигналов позволяют в дальнейшем снизить частоту отсчетов и привести ее, как и для способа квадратурной дискретизации, к $2F_c$. Дискретизацию второго порядка узкополосных сигналов ($f_0 \gg 2F_c$) можно выполнить одним АЦП, если в одноканальной системе выбирается равномерный шаг дискретизации с частотой $f_d = 4f_0$. В современной РПА даже в случае использования нелинейной гидроакустики прини-

маются сигналы на $f_0 \leq 200$ кГц. Использование скоростных АЦП типа 1107 ПВ1, которые имеют время преобразования порядка 150 нс, дает возможность обеспечить высокую частоту дискретизации. Равномерная дискретизация узкополосного сигнала с частотой $f_d = 4f_0$ сравнима с дискретизацией аналитического сигнала. Например, для тонального радиоимпульса

$$s(t) = \begin{cases} A(t) \cos(\omega_0 t + \varphi_0), & -\tau_n/2 \leq t \leq \tau_n/2, \\ 0, & \text{в других случаях,} \end{cases} \quad (12.7)$$

где $A(t)$ — огибающая сигнала; φ_0 — начальная фаза; аналитическая запись имеет вид [17]

$$\bar{s}(t) = A(t) \cos(\omega_0 t + \varphi_0) + jA(t) \sin(\omega_0 t + \varphi_0) = s(t) + js(t). \quad (12.8)$$

После дискретизации

$$\bar{s}(n) = A(n) \cos(\omega n + \varphi_0) + jA(n) \sin(\omega n + \varphi_0) = s(n) + js(n), \quad (12.9)$$

где n — номер отсчета сигнала во времени; $\omega = 2\pi f_0/f_d$ — относительная частота. Два рядом стоящих отсчета действительной последовательности (без учета начальной фазы)

$$\left. \begin{aligned} s(n) &= A(n) \cos(\omega n); \\ s(n-1) &= A(n-1) \cos[(n-1)\omega]. \end{aligned} \right\} \quad (12.10)$$

Из второго уравнения (12.10) можно определить

$$\sin n\omega = s(n-1)/A(n-1) \sin \omega - s(n) \cos \omega / \sin \omega. \quad (12.11)$$

Подставив (12.11) в (12.9), получим

$$\bar{s}(n) = s(n) + j[(A(n)s(n-1)/A(n-1) \sin \omega) - (s(n) \cos \omega / \sin \omega)]. \quad (12.12)$$

При $f_d = 4f_0$ и $\omega = \pi/2$ имеем

$$\bar{s}(n) = \bar{s}(n) + j\rho(n)s(n-1), \quad (12.13)$$

где $\rho(n) = A(n)/A(n-1)$ — амплитудный коэффициент. Для прямоугольного радиоимпульса $\rho(n) = 1$, тогда

$$\bar{s}(n) = s(n) + js(n-1). \quad (12.14)$$

Уравнения (12.13) и (12.14) позволяют упростить дискретизацию сигнала и значительно облегчить построение цифровой СПО.

Выбор разрядности АЦП зависит не только от динамического диапазона входного сигнала, но и от способа цифровой обработки и формы представления чисел (с фиксированной или плавающей запятой). Ввиду высокого быстродействия процессоров СПО применять универсальные ЭВМ в качестве таких процессоров в РПА пока не представляется возможным. Поэтому в основном используются спецпроцессоры, которые оперируют с числами, представляемыми с фиксированной запятой. Цифровую обработку можно

выполнять и при однобитовом представлении информации, т.е. при «жестком» ограничении сигнала [115]. Но «жесткое» ограничение сигнала ведет к ухудшению помехоустойчивости. Потери в помехоустойчивости становятся приемлемыми уже при представлении информации четырьмя битами [121], а обработку можно считать линейной. Однако при этом не учитывается динамический диапазон входного сигнала и точность выполнения арифметических операций в цифровых процессорах обработки сигнала. Если динамический диапазон сигнала на входе АЦП составляет 20—40 дБ, то достаточно семиразрядного АЦП без учета знака. С другой стороны, если операции фильтрации и лучеформирования выполняются нерекурсивными фильтрами, то эффекты усечения и округления дают среднеквадратичную ошибку порядка [73]

$$\sigma = Q_n^2/12, \quad (12.15)$$

где Q_n — величина шага квантования АЦП. Поэтому дополнительные шумы, вносимые арифметическими устройствами СПО, должны быть меньше уровня шумов, приведенных ко входу системы. В конечном счете разрядность АЦП в основном определяется условиями приема сигналов на фоне помех. Для РПА практическая разрядность АЦП равна 8—10 бит, что достаточно для получения малых шумов усечения и округления в цифровых СПО и вполне приемлемо при условии сжатия динамического диапазона входного сигнала за счет предварительной обработки в АПУ.

§ 12.3. Цифровые устройства временной обработки эхосигналов

В цифровых системах временная обработка (ВО) сигналов может быть выполнена как в частотной области, так и во временной. В частотной области фильтрация основывается на дискретном преобразовании Фурье (ДПФ) входного сигнала, которое чаще всего выполняется с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ). Результат преобразования, т.е. спектр сигнала $\bar{X}(k)$, умножается на комплексно сопряженный сигналу коэффициент передачи системы

$$Y(k) = \bar{X}(k) \bar{H}^*(k). \quad (12.16)$$

Алгоритмы БПФ детально проработаны в [73] и дают выигрыш по сравнению с ДПФ в объеме вычислительных и аппаратных затрат. Число умножений, являющихся самой трудоемкой операцией, может быть доведено до $N \log^2 N$ вместо N^2 при прямом ДПФ (N — длина преобразования). Однако известно [73], что эффективность БПФ начинает проявляться при $N \geq 2^6$. В РПА при длительностях сигналов единицы миллисекунд и дискретизации по спектру число отсчетов $N = 10 \div 20$. В [114] показано, что при такой длине преобразования БПФ дает даже про-

игрыш по сравнению с вычислительными затратами для прямой свертки. Поэтому в РПА в основном используется алгоритм свертки во времени, который в дискретной форме имеет вид

$$y(n) = (1/N) \sum_{k=0}^{N-1} x(n-k) h(k) = (1/N) \sum_{k=0}^{N-1} x(k) h(n-k), \quad (12.17)$$

где N — длина свертки; $k=0, N-1$; $h(k)$ — отсчеты импульсной характеристики фильтра. Если $h(k)$ — дискретное зеркальное отображение входного сигнала $s(k)$, то по (12.17) выполняется согласованная фильтрация.

Выражение (12.17) описывает нерекурсивный фильтр или фильтр с импульсной характеристикой конечной длины (КИХ-фильтр). В общем виде полное разностное уравнение цифрового фильтра имеет вид [72]

$$y_n = \sum_{k=0}^{N-1} a_k x_{n-k} - \sum_{k=1}^{M-1} b_k y_{n-k}. \quad (12.18)$$

В правой части выражения (12.18) первая сумма описывает КИХ-фильтр, а вторая рекурсивный фильтр с бесконечной импульсной характеристикой (БИХ-фильтр).

Если в РПА ВО предшествует пространственной, то использование БИХ-фильтра не рекомендуется, так как фазовая характеристика таких фильтров не всегда линейна и может вносить значительные ошибки в систему формирования ДН. Тогда, считая в (12.18) все коэффициенты $b_k=0$, рассмотрим КИХ-фильтр в чистом виде. Импульсная характеристика КИХ-фильтра может содержать четное или нечетное число коэффициентов, которые могут быть расположены симметрично или антисимметрично. Число и порядок расположения коэффициентов определяет частотные свойства фильтров [73]. Для фильтрации узкополосных сигналов, представленных квадратурными отсчетами, наибольший интерес вызывают КИХ-фильтры с симметричной импульсной характеристикой, содержащей нечетное число членов и имеющих вид [73]

$$H(\omega) = \sum_{n=0}^{(N-1)/2} a(n) \cos(\omega n), \quad (12.19)$$

где $a(0)=h[(N-1)/2]$; $a(n)=2h[(N-1)/2-n]$; $n=0, \overline{(N-1)/2}$; $h(n)$ — отсчеты импульсной характеристики. Форма частотной характеристики для одной из возможных $h(n)$ показана на рис. 12.5. Частотная характеристика такого фильтра, как и любых дискретных систем, периодична с периодом 2π . Так как импульсная характеристика, представляющая собой коэффициенты ряда Фурье, ограничена конечным числом членов, то в частотной характеристике наблюдаются нежелательные пульсации как в полосе пропускания, так и вне ее, которые следует умень-

шить, а прямоугольность АЧХ повысить путем модификации импульсной характеристики, т.е. представить ее в виде функций известных как окна Хэмминга, Кайзера, Ланцоша, и др. [100]. Применение окон (за исключением окна Ланцоша) расширяет полосу пропускания фильтра относительно расчетной величины и требует увеличения длины свертки. Основным недостатком применения окон при аппаратурной реализации КИХ-фильтров является использование умножителей, причем все умножения в общем случае должны быть выполнены за период дискретизации. Например, если в гидролокаторе $\tau_{\text{и}} = 1$ мс и $f_0 = 20$ кГц, то при дискретизации второго порядка (когда $f_{\text{д}} = 4f_0$) получаем $f_{\text{д}} =$

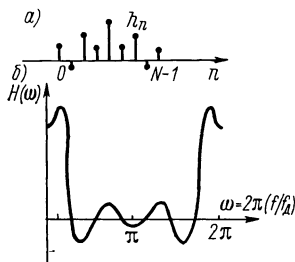


Рис. 12.5. Импульсная h_n (а) и частотная $H(\omega)$ (б) характеристики КИХ-фильтра.

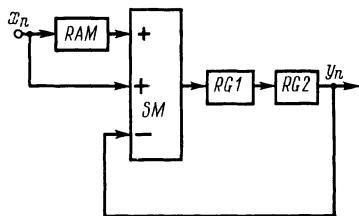


Рис. 12.6. Структурная схема КИХ-фильтра.

$= 80$ кГц. Используя окно Ланцоша, ограниченное по первым нулям, для получения выходного отсчета фильтра потребуется выполнить 80 операций умножения и 79 операций сложения за время 12,5 мкс. Если операция умножения эквивалентна 4 операциям сложения, то производительность процессоров $\Pi_1 = [4N + (N - 1)] f_{\text{д}}$ составляет. $\Pi_1 \approx 32$ млн. оп/с. Естественно такое громадное быстродействие трудно реализуемо. Поэтому применительно к сигналам РПА желательно использовать более простые фильтры. Так, для прямоугольного импульса вида

$$s(n) = A(n) \cos(n\omega), \quad n = \overline{0, N-1}, \quad (12.20)$$

при частоте дискретизации $f_{\text{д}} = 4f_0/(2l + 1)$, где $l = 0, 1, 2, \dots$... относительная частота $\omega = (2l + 1)\pi/2$, имеем

$$h(k) = \cos[k(2l + 1)\pi/2], \quad k = \overline{0, N-1}. \quad (12.21)$$

Из выражения (12.21) видно, что коэффициенты импульсной характеристики имеют значения 1, 0, -1 и т.д. Такой простейший фильтр не требует выполнения операций умножения, а из-за нулевых коэффициентов операций сложения потребуется $(N - 1)/2$, что резко снизит требования к быстродействию процессора ВО. На выходе фильтра сигнал вида

$$y_n = [2/(N + 1)] \sum_{k=0}^{N-1} x(n - k) \cos[k(2l + 1)\pi/2] \quad (12.22)$$

может быть получен по следующей простой структурной схеме (рис. 12.6). Круговая свертка в таком фильтре выполняется следующим образом: входной сигнал x_n поступает на сумматор SM и память RAM. Пройдя сумматор, x_n -й отсчет записывается в регистр RG1, в следующем такте x_{n+1} -й отсчет запишется в RG1, а x_n отсчет переписывается в RG2. С приходом x_{n+2} отсчета на выходе сумматора имеем: $y_3 = x_{n+2} - x_n$ и т. д.

$$y_4 = x_{n+3} - x_{n+1}; \quad y_5 = x_{n+4} - x_{n+2} + x_n; \quad y_6 = x_{n+5} - x_{n+3} + x_{n+1}. \quad (12.23)$$

Если длина свертки $N = 5$, а RAM дает задержку на $N + 1$ тактов, то в седьмом такте получим

$$y_7 = x_{n+6} - x_{n+4} + x_{n+2} - x_n + x_n = x_{n+6} - x_{n+4} + x_{n+2}. \quad (12.24)$$

Выражения (12.23) и (12.24) показывают, что, начиная с пятого такта работы фильтра, на выходе образуется результат круговой свертки входного сигнала с импульсной характеристикой фильтра. При такой структуре фильтра за период дискретизации требуется выполнить всего две операции сложения. Тогда быстродействие фильтра при ранее приведенных исходных данных будет $\Pi_2 = 160$ тыс. оп/с, что на два порядка меньше, чем при применении окна Ланцоша. В этом случае быстродействие не зависит от длины свертки в отличие от фильтров с применением других окон. Частотная характеристика полосового фильтра, реализованного по данной структурной схеме, имеет вид

$$H(\omega) = 2 \sin[(N + 1)(\omega - \omega_0)/4] / \{(N + 1) \sin[(\omega - \omega_0)/2]\} \quad (12.25)$$

с полосой пропускания вдвое шире, чем низкочастотного фильтра на N точек, из-за последовательной и раздельной фильтрации синфазной и квадратурной составляющих входного сигнала. Форма ее практически совпадает с формой спектра прямоугольного радиопульса (рис. 12.7). Такой фильтр теоретически можно считать согласованным при условии, если полоса пропускания его равна [94] $2\Delta f_{\text{онм}} = 0,4/\tau_n$. В этом случае требуемая длина свертки

$$N = (5\tau_n f_d/2) - 1, \quad (12.26)$$

по которой определяется и полоса пропускания полосового фильтра

$$2\Delta f_{\text{ф}} \approx f_d/(N + 1). \quad (12.27)$$

Выражения (12.26) и (12.27) позволяют практически определить требуемые параметры одиночного фильтра. Частотная характеристика гладкая в полосе пропускания (рис. 12.7) и имеет пульсации согласно (12.25), достигающие уровня — 14 дБ в полосе непропускания. Форма реально принимаемых эхосигналов

в РПА далека от прямоугольной и имеет вид трапеции или коло-кольного импульса, т. е. спектр не отличается от $\sin(\pi t/\tau_n)/(\pi t/\tau_n)$. С другой стороны, энергия сигнала за пределами главного лепестка спектра мала, и шумы, преобладающие в полосе непропускания, будут ухудшать соотношение сигнал/помеха. Поэтому на практике стремятся иметь максимальное подавление вне полосы пропускания. Можно эту задачу решить последовательным соединением простейших фильтров. Например, соединение фильтров с $N_1=5$ и $N_2=9$ обеспечивает подавление в полосе непропускания более 20 дБ при $k_n=2,8$, а соединение фильтров с $N_1=5$, $N_2=9$, $N_3=13$ свыше 30 дБ и при $k_n=2,5$.

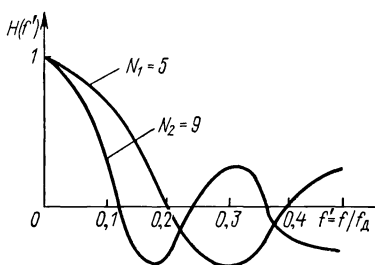


Рис. 12.7. Форма частотной характеристики КИХ-фильтра.

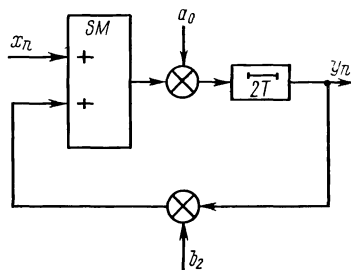


Рис. 12.8. Структурная схема полосового БИХ-фильтра.

В [100] описан алгоритм построения на базе простейших фильтров системы ВО с высокой прямоугольностью и большим подавлением (свыше 40 дБ), основанный на алгоритме Тьюки. Но этот алгоритм не следует использовать, если ВО предшествует СПО, так как в фазовой характеристике фильтра Тьюки имеются скачки на $\pm \pi$.

КИХ-фильтры при работе на низкой частоте отсчетов, когда небольшое изменение длины свертки приводит к существенному изменению полосы пропускания (12.27), не обладают хорошей адаптацией. БИХ-фильтры более универсальны. Менять их параметры можно изменением величины коэффициентов фильтра. Так, если в (12.18) принять все коэффициенты $a_k=0$ (за исключением a_0), то разностное уравнение рекурсивного фильтра примет вид

$$y_n = a_0 x_n - \sum_{k=1}^{N-1} b_k y_{n-k}. \quad (12.28)$$

Достоинство таких рекурсивных фильтров еще и в том, что они при аппаратурной реализации требуют значительно меньшего объема памяти и вычислительных затрат по сравнению с КИХ-фильтрами. Полосовой БИХ-фильтр, частотная характеристика которого соответствует одиночному резонансному контуру, для сигнала, представленного квадратурными отсчетами (12.14),

может быть выполнен по структурной схеме, приведенной на рис. 12.8. Разностное уравнение такого фильтра имеет вид

$$y_n = a_0 x_n + b_2 y_{n-2}, \quad (12.29)$$

т.е. входной сигнал, умноженный на коэффициент a_0 , суммируется с выходным отсчетом y_{n-2} (вследствие задержки на 2 периода), умноженным на коэффициент b_2 . По известной полосе пропускания фильтра $2\Delta f_\Phi$, определив его постоянную времени

$$\tau = 1/(\pi 2 \Delta f_\Phi), \quad (12.30)$$

рассчитывают коэффициенты

$$a_0 = 2T/\tau; \quad b_2 = -e^{-2T/\tau}, \quad (12.31)$$

где T — период дискретизации. Синхронное изменение этих коэффициентов позволяет в широких пределах изменять полосу пропускания рекурсивного фильтра. В общем случае коэффициенты a_0 и b_2 могут быть представлены в виде 2^{-i} , что позволяет исключить умножители из приведенной структурной схемы.

Временную обработку в РПА можно построить на простейших фильтрах и высокой частоте дискретизации. Однако технически не целесообразно строить систему на частоте $f_d = 80$ кГц, имея ширину спектра сигнала $F_c = 1$ кГц при $\tau_n = 1$ мс. В цифровых системах ВО имеется возможность снижения частоты отсчетов после фильтрации сигналов.

В [48] введено понятие децимации, описываемое алгоритмом

$$y_n = \left\{ (1/N) \sum_{k=0}^{N-1} x(n-k) h(k) \right\} p(n), \quad (12.32)$$

где $p(n) = \begin{cases} 1 & \text{при } n=0; \pm D; \pm 2D; \\ 0 & \text{в других случаях} \end{cases}$; D — коэффициент децимации.

Алгоритм (12.32) показывает, что после свертки входной последовательности с импульсной характеристикой фильтра за счет высокой степени подавления спектра сигнала и шумов в полосе непропускания, можно снижать частоту отсчетов (децимировать). Например, система из трех последовательно соединенных фильтров с длинами свертки $N_1 = 5$; $N_2 = 9$; $N_3 = 13$ дает ослабление более 30 дБ вне полосы частот $\Delta f = f_0 \pm f_d/(N_3 + 1)$. Тогда выходная частота отсчетов может быть снижена до величины $f_{d+1} \geq 2f_d/(N_3 + 1)$, что не приводит к наложениям спектра при восстановлении сигнала. При p — каскадах общий коэффициент децимации можно разделить покаскадно $D = D_1 \times D_2 \times \dots \times D_p$, а выходную частоту отсчетов довести до предела Котельникова. Такая покаскадная фильтрация с децимацией позволяет значительно уменьшить объем аппаратных и вычислительных затрат. В одноканальных системах фильтрации синфазной и квадратурной составляющих сигнала (12.22) на коэффициент децимации накладывается ограничение — он должен быть нечетным числом.

§ 12.4. Цифровые устройства пространственной обработки эхосигналов

В цифровых устройствах пространственной обработки (ПО) эхосигналов, как и в аналоговых устройствах, применяются два метода формирования ДН: метод задержки и суммирования и метод фазирования.

Метод задержки и суммирования реализуется несколькими способами. При «жестком» ограничении сигнала (однобитовое представление) задержка выполняется на регистрах сдвига. При многозарядном представлении сигнала может быть два варианта: дискретизация с частотой, кратной задержке Δt_n прихода сигнала на соседние элементы АС в направлении θ_k , а затем синхронное сложение; дискретизация по верхней частоте спектра сигнала и интерполяция полученных значений для формирования ДН в направлении θ_k . Способ, основанный на «жестком» ограничении сигнала, носит название DIMUS [115] и реализован в гидролокаторе Attas Sonar 950 и эхолоте Attas Fischfinder 791 DS [45].

Цифровым этот способ может быть назван условно, так как из цифровых схем используются только регистры сдвига с переменным тактированием, служащие в качестве управляемых ЛЗ. Ограничение же сигнала, суммирование и восстановление его амплитуды после суммирования выполняется аналоговыми устройствами. Однако даже такое частичное применение цифровых схем позволяет создать довольно точную систему управляемой задержки, что позволяет осуществить электронное сканирование ДН.

Практика показывает, что потери в помехоустойчивости могут достигать 6 дБ, снижая дальность действия РПА. В эхолоте Atlas Fischfinder 791DS сделана попытка исключить этот недостаток за счет амплитудной модуляции сигнала после формирования ДН, используя отдельный линейный аналоговый тракт обработки сигнала. Сумма выходных сигналов от трех центральных каналов АС проходит линейную обработку с ВАРУ и поступает на схему умножения, на второй вход которой подается сигнал сформированного луча. При перемножении амплитуда сигнала восстанавливается. Однако этот искусственный прием проигрывает по сравнению с линейной системой в разрешении объектов поиска, так как слабая цель маскируется более сильной, т. е. устранить полностью недостатки «жесткого» ограничения сигнала не удастся. Поэтому, несмотря на простоту технической реализации системы DIMUS, предпочтительнее строить линейные системы, основанные на многозарядном представлении входного сигнала.

В РПА для создания сектора одновременного обзора пространства при цифровой обработке сигнала, как правило, формируется статический веер ДН с шагом $\Delta\theta$. Очевидно, прямым способом реализации метода задержки и суммирования было бы

выполнение дискретизации сигнала в каждом канале АС с периодом $T = d \sin \Delta\theta / c$. Эти значения заносятся в оперативную память (ОЗУ), а затем из нее считываются те отсчеты, которые необходимы для синхронного сложения согласно номеру ДН

$$L(n, p) = (1/M) \sum_{m=0}^{M-1} s_m(nT - mpT), \quad (12.33)$$

где $p = \overline{0, P-1}$; P — число ДН в секторе обзора. Например, в гидролокаторе для сектора обзора 90° достаточно сформировать веер из 15 лучей с шагом, $\Delta\theta = 6^\circ$, длительностью сигнала $\tau = 1$ мс с несущей частотой $f_0 = 20$ кГц. Для эквидистантной АС, у которой $d = \lambda_0/2$ имеем $T \approx 2,6 \cdot 10^{-6}$ с и $f_d = 380$ кГц. При ширине спектра сигнала $F_c = 1$ кГц строить ДФУ на частоте отсчетов $f_d = 380$ кГц нелогично, так как требуется очень большой объем сверхскоростной памяти $RAM = M^2 P b$ (b — разрядность информации). Поэтому в РПА способ прямого синхронного сложения не нашел применения, а метод задержки и суммирования в цифровых системах ДФУ реализуется на интерполяционных фильтрах.

Из интерполяционных полиномов Лагранжа [84] при \sin -м входном сигнале можно использовать полином первой степени. В этом случае алгоритм линейной интерполяции определяется

$$s_n(n) = s(n) - k[s(n) - s(n-1)], \quad (12.34)$$

где $s(n)$ и $s(n-1)$ — два соседних отсчета сигнала; $k = \Delta\tau_k/T$ — коэффициент интерполяции. Интерполированные значения, вычисленные в каждом канале антенного тракта и соответствующие направлению прихода сигнала θ_k , суммируются

$$L(n, \theta_k) = (1/M) \sum_{m=0}^{M-1} \{s(n, m) - mk[s(n, m) - s(n-1, m)]\}. \quad (12.35)$$

Представив выражение (12.35) в другом виде

$$L(n, \theta_k) = (1/M) \sum_{m=0}^{M-1} (1 - mk) s(n, m) + (1/M) \sum_{m=0}^{M-1} mks(n-1, m), \quad (12.36)$$

коэффициенты $(1 - mk)$ и mk можно считать отсчетами импульсных характеристик двух КИХ-фильтров, через которые проходит сигнал. Результаты фильтрации суммируются с задержкой одного результата на такт, что говорит о возможности выполнения как временной, так и пространственной обработки на одноступенчатых устройствах. Так как $mk = md \sin \theta_k / cT$ может по абсолютной величине превышать единицу, то, как и для случая синхронного суммирования, необходима дополнительная память при решении

(12.36), с помощью которой выполняется задержка на целое число mk . Структурная схема аппаратной реализации алгоритма (12.35) приведена на рис. 12.9. Интерполирующие устройства стоят в канале обработки сигнала от каждого элемента АС (после блока АПУ). В момент времени n на входе сумматора $SM1$ присутствуют S_n -й и задержанный на период дискретизации S_{n-1} -й отсчеты. Вычисленная разность умножается в умножителе на величину mk , т.е. на коэффициент интерполяции за вычетом целой части $m\Delta\tau_k/T$. Результат умножения вычитается в сумматоре $SM2$ из S_n -го отсчета и записывается в память RAM . Из RAM отсчеты считываются с задержкой на целую часть mk и по-

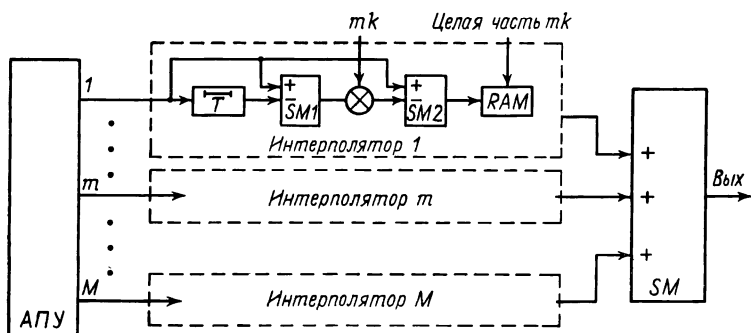


Рис. 12.9. Структурная схема интерполяционного формирователя ДН.

ступают на сумматор-накопитель SM . Сумма интерполированных значений сигналов от всех M каналов АС дает отсчет сигнала в направлении θ_k .

Такая реализация выгодна, если число формируемых ДН больше числа секций АС. Если же число ДН меньше числа секций (эхолот с электронной стабилизацией ДН), то интерполяционный фильтр целесообразно ставить в ДФУ. Для эхолота в этом случае требуется выполнить всего M умножений и $(3M-1)$ сложений, т.е. вычислительные затраты минимальны. Однако алгоритм (12.35) имеет и недостатки. Во-первых, аппроксимация прямой линией синусоидального сигнала, даже при четырех выборках за период, вносит амплитудную ошибку до 15 %. Причем величина ошибки зависит от начальной фазы. Во-вторых, прямое применение линейной интерполяции не позволяет использовать децимацию, и процессор ДФУ должен работать на высокой частоте отсчетов, что резко увеличивает требования к его быстродействию. Например, при $M=16$ и $f_d=80$ кГц производительность ДФУ составит $\Pi_3=8,88$ млн. оп/с.

Для узкополосных сигналов, используемых в РПА, предпочтительнее применять в цифровых ДФУ метод фазирования, хотя он имеет некоторые ограничения, связанные с конечной полосой пропускания фазированной антенны [7, 54, 86].

Частотная характеристика таких ДФУ имеет вид

$$H(\omega) = \sin[Md \sin \theta_k (\omega - \omega_0)/2c] / M \sin[d \sin \theta_k (\omega - \omega_0)/2c], \quad (12.37)$$

где ω — текущая частота. При больших углах компенсации θ_k и широком спектре сигнала в таких системах возникают искажения ДН и потери энергии сигнала за счет конечной полосы пропускания фазированной АС, это необходимо учитывать при проектировании ДФУ. Для практических расчетов, если

$$F_c M d \sin \theta_k / c \leq 0,5, \quad (12.38)$$

то потери не превышают 0,8 дБ [7]. Метод фазирования в цифровых ДФУ основывается на алгоритме

$$L(n, \theta_k) = (1/M) \sum_{m=0}^{M-1} \bar{s}(n, m\alpha) e^{-jm\alpha_k}, \quad (12.39)$$

где $\alpha = 2\pi d \sin \theta_k / \lambda$ — разность фаз сигналов приходящих на соседние секции АС с направления θ ; $\alpha_k = 2\pi d \sin \theta_k / \lambda_0$ — фазировочный множитель для ДН в направлении θ_k . Используя запись аналитического сигнала при равномерной дискретизации второго порядка в виде

$$\bar{s}(n, m\alpha) = s(n, m\alpha) + j(1/\sin \omega) [\rho(n, m)s(n-1, m\alpha) - s(n, m\alpha) \cos \omega],$$

получим обобщенный алгоритм для цифрового ДФУ методом фазирования при равномерной дискретизации узкополосного сигнала

$$\begin{aligned} \bar{L}(n, \theta_k) = (1/M \sin \omega) \left\{ \sum_{m=0}^{M-1} [s(n, m\alpha) \sin(\omega + m\alpha_k) + \right. \\ \left. + \rho(n, m)s(n-1, m\alpha) \sin m\alpha_k] + j[\rho(n, m)s(n-1, m\alpha) \times \right. \\ \left. \times \cos(m\alpha_k) - s(n, m\alpha) \cos(\omega + m\alpha_k)] \right\}. \quad (12.40) \end{aligned}$$

На первый взгляд эта структура проигрывает способу линейной интерполяции (12.35), так как требует выполнения комплексного умножения. Но учитывая, что частота отсчетов до ДФУ с помощью децимации может быть доведена до предела Котельникова, то получается общий выигрыш в быстродействии процессора. Так, для приведенного примера $M = 16$, $\tau_n = 1$ мс, $f_d = 80$ кГц для метода фазирования частота поступления комплексных отсчетов на ДФУ может быть снижена до 4 кГц. Тогда требуемая производительность процессора будет $\Pi_4 = 1,3$ млн. оп/с. Алгоритм (12.40) может быть минимизирован, если окончательная частота отсчетов, поступающих на ДФУ, при

использовании децимации будет $f_d = 4f_0/(2l + 1)$, где $l = 0, 1, 2, \dots$

$$\begin{aligned} \bar{L}(n, \theta_k) = (1/M) \left\{ \sum_{m=0}^{M-1} [s(n, m\alpha) \cos m\alpha_k + (-1)^l \rho(n, m) \times \right. \\ \times s(n-1, m\alpha) \sin m\alpha_k] - j [s(n, m\alpha) \sin m\alpha_k - \\ \left. - (-1)^l \rho(n, m) s(n-1, m\alpha) \cos m\alpha_k] \right\}. \end{aligned} \quad (12.41)$$

Обычно априори известна форма огибающей сигнала, поступающего на ДФУ. Тогда за счет дополнительного интерполирующего звена можно выполнить операцию приведения соседних от-

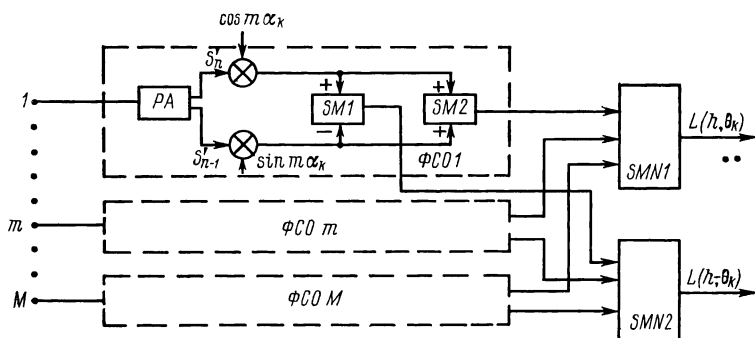


Рис. 12.10. Структурная схема ДФУ, реализующая метод фазирования.

счетов сигнала к одной амплитуде, т.е. учесть $\rho(n)$. Например, форма огибающей прямоугольного импульса на выходе согласованного фильтра практически треугольна. В этом случае приведение к одной амплитуде выполняется по следующему алгоритму:

$$s'_n = (s_n - s_{n-2})/2. \quad (12.42)$$

Учитывая (12.42), окончательный алгоритм ДФУ для АС с $d = \lambda_0/2$ может быть записан

$$\begin{aligned} \text{Re} [\bar{L}(n, \theta_k)] = (1/M) \sum_{m=0}^{M-1} [s'(n, m\alpha) \cos m\alpha_k \pm \\ \pm (-1)^l s'(n-1, m\alpha) \sin m\alpha_k]. \end{aligned} \quad (12.43)$$

Знаки «плюс» и «минус» указывают на то, что одним ДФУ формируются отсчеты для двух направлений $\pm \theta_k$. Структурная схема цифрового ДФУ, реализующего алгоритм (12.43), приведена на рис. 12.10.

В данной структурной схеме формирователь синфазных отсчетов (блок ФСО) стоит в каждом канале антенного тракта, т.е. случай, когда число формируемых ДН больше числа каналов. s_n -й и s_{n-1} -й отсчеты каждого m -го канала, пройдя через блок

приведения амплитуд (РА), поступают на умножители, на вторые входы которых поступают коэффициенты $\cos m\alpha_k$ и $\sin m\alpha_k$. Результаты умножения, суммируясь/вычитаясь в сумматорах (блоки $SM1$ и $SM2$), поступают на соответствующие сумматоры-накопители (блоки $SMN1$ и $SMN2$), где и формируются отсчеты сигнала для направлений $\pm \theta_k$. Если в данный момент времени была вычислена синфазная составляющая сигнала обеих ДН, то в момент времени $(n + 1)$ вычисляется квадратурная составляющая аналогично отсчетам сигнала после дискретизации с частотой $4f_0/2l + 1$. Требуемая производительность такого ДФУ при $M = 16$, $f_d = 4$ кГц будет равна $\Pi_5 = 700$ тыс. оп/с, т. е. более чем на порядок ниже, чем для формирования с линейной интерполяцией.

В случае использования широкополосных сигналов возможно применение совмещенного фазо-временного метода формирования ДН. Для этого АС из M секций разбивается на P подрешеток из Q элементов каждая. Внутри подрешетки формирование ДН выполняется методом фазирования, а между подрешетками — методом задержки и суммирования

$$\bar{L}(n, \theta_k) = (1/M) \sum_{p=0}^{P-1} \sum_{q=0}^{Q-1} \bar{s}(n - P, qa) e^{-jq\alpha_k}. \quad (12.44)$$

Общая полоса пропускания системы ДФУ (12.44) определяется одной подрешеткой.

Одной из разновидностей метода фазирования является пространственно-корреляционный метод формирования ДН [76], основанный на преобразовании Фурье и формировании ДН в частотной области

$$\bar{L}(k, \theta_k) = (1/M) \sum_{m=0}^{M-1} \bar{X}(k, m) e^{-jm\omega_{np}}, \quad (12.45)$$

где $\omega_{np} = (2\pi f_0 \sin \theta_k)/f_d$ — относительная пространственная частота; $\bar{X}(k, m)$ — спектр входного сигнала. При большом числе секций АС этот метод дает существенный выигрыш в части аппаратных и вычислительных затрат. Все цифровые ДФУ, рассмотренные для линейных АС, могут быть применимы для плоских, цилиндрических и сферических АС.

§ 12.5. Пример синтеза цифровых систем первичной обработки

Рассмотрим рыбопоисковый гидролокатор секторного обзора с плоской АС, причем по вертикали формируется только одна ДН, в горизонтальной плоскости — веер ДН в заданном секторе обзора. Исходные данные: тип излучаемых сигналов — однотональная посылка на центральной частоте 30 кГц длительностью — 1, 2, 4, 8, 16 мс; в секторе 90° необходимо сформировать веер из 15 ДН с шагом 6° ; число элементов АС в горизонтальной плоскости $M = 16$ и расстояние между элементами $d = \lambda_0/2$; динами-

ческий диапазон сигнала на входе системы 120 дБ (при $U_{\min} = 0,5$ мкВ); глубина регулировки ВАРУ—80 дБ; радиальная скорость объектов поиска $v_p \leq 2$ м/с; выходной сигнал СПО — отсчеты в виде восьмиразрядного кода, соответствующие амплитуде входного сигнала.

В аналоговых СПО традиционно сложилось, что первой выполняется задача разрешения эхосигнала по пространству, а затем в каждой сформированной ДН решается задача обнаружения во времени. В современной теории обработки сигналов [106] показано, что среднеквадратичная ошибка пеленгации объектов поиска σ_{θ_k} уменьшается с увеличением соотношения сигнал/

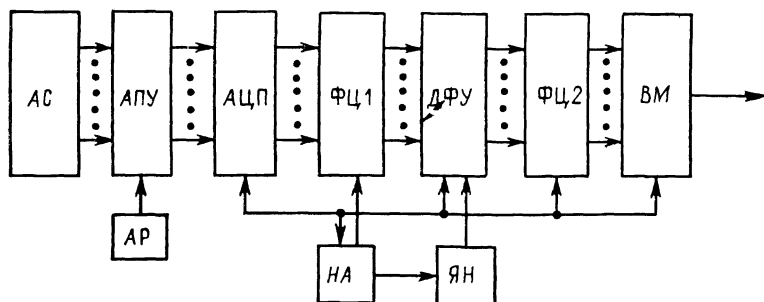


Рис. 12.11. Структурная схема системы пространственной обработки эхосигнала гидролокатора секторного обзора.

шум q и отношения длины антенного раскрыва к длине волны $l_{\text{эф}}/\lambda$:

$$\sigma_{\theta_k} = 1/ql_{\text{эф}}. \quad (12.46)$$

Так как согласованная фильтрация улучшает соотношение сигнал/шум при неизменных параметрах АС, то временную обработку лучше выполнять до пространственной. С другой стороны, цифровые системы ДФУ основываются на интерполяционных методах вычисления отсчетов для синфазного сложения. Ошибка вычислений тем меньше, чем «чище» сигнал [104]. Следовательно, СПО целесообразнее строить по следующей схеме: временная обработка каждого канала АС, а затем формирование ДН (рис. 12.11).

Эхосигнал, принятый АС, поступает на блок АПУ. Все шестнадцать АПУ идентичны по коэффициенту передачи и фазовому сдвигу. Используя, как технически наиболее просто реализуемую, равномерную дискретизацию с частотой $f_d = 4f_0/(2l+1)$, требования к полосе пропускания АПУ можно определить из следующих соображений. Если принять $l = 3$, то АПУ должен обеспечивать ослабление составляющих не менее чем на 40 дБ на частотах $(30 \pm 8,57)$ кГц. При $l = 2$ такое же ослабление необходимо обеспечить уже на частотах (30 ± 12) кГц, а при $l = 0$ на частотах

тах (30 ± 60) кГц. Очевидно, что наиболее простой АПУ получается в последнем случае. Ослабление более чем на 40 дБ на частоте 90 кГц может обеспечить одиночный резонансный контур с полосой пропускания $2\Delta f = 4,9$ кГц и центральной $f_0 = 30$ кГц. Такое же ослабление обеспечивается и при последовательном соединении двух контуров, настроенных на 30 кГц, с полосой пропускания каждого $2\Delta f = 9$ кГц. С другой стороны, от АПУ требуется обеспечение глубины регулировки ВАРУ порядка 80 дБ. Один аналоговый умножитель, построенный на микросхеме К525ПС1, имеет линейный участок регулировки порядка 40—50 дБ, т. е. необходимо два последовательно включенных каскада умножения. После каждого умножителя необходим фильтр, что и приводит к системе последовательно соединенных контуров. Тогда, если полоса пропускания каждого контура равна $2\Delta f = 9$ кГц, то общая полоса пропускания АПУ $2\Delta f_{\text{АПУ}} = 6,4$ кГц. При такой широкой полосе пропускания нестабильность сдвига фазы между каналами не превышает $\pm 5^\circ$.

Динамический диапазон сигнала, прошедшего ВАРУ, на выходе АПУ составляет 40 дБ, который может обеспечить 8-разрядный АЦП ($7 + 1$ знак). Выбрав стандартный уровень опорного напряжения для АЦП $U_0 = \pm 5$ В, получим шаг квантизации $Q_A \approx 40$ мВ. В этом случае коэффициент усиления АПУ должен быть не менее $k = 80 \cdot 10^3$. Но при такой разрядности входных слоев для цифровых фильтров шумы округления и усечения будут иметь средний уровень порядка 12 мкВ (см. § 12.2), что соизмеримо с входными шумами на АС. Следовательно, необходимо увеличить разрядность АЦП до 10 разрядов ($9 + 1$ знак). В этом случае шумы усечения и округления порядка 3 мкВ значительно меньше входных шумов. 10-разрядный АЦП с частотой дискретизации 120 кГц сравнительно легко строится на микросхемах серий К544 и К155 или на гибридных интегральных схемах АЦП. Выбранная частота дискретизации $f_d = 120$ кГц значительно превышает необходимую для работы по комплексной огибающей сигнала, но позволяет строить широкополосные АПУ с малым разбросом амплитудно-фазовых характеристик отдельных усилителей. Максимальная ширина спектра сигнала равна 1 кГц, тогда можно использовать ДФУ, реализующий метод фазирования. Для шестнадцатиканальной АС такое ДФУ на максимальном угле отклонения $\theta_k = \pm 42^\circ$ имеет полосу пропускания, равную $2\Delta f = 5,2$ кГц, что значительно больше ширины спектра сигнала. Следовательно, эта система формирования ДН практически не вносит потерь в тракт обработки сигнала. Метод фазирования позволяет формировать ДН по комплексной огибающей сигнала, в этом случае частота дискретизации 120 кГц явно избыточна. Снизить частоту отсчетов, поступающих на ДФУ, можно за счет децимации после цифровой фильтрации сигнала.

До ДФУ можно использовать нерекурсивные фильтры, обладающие линейной фазовой характеристикой. Аппаратурная реализация таких фильтров довольно проста (см. рис. 12.6), но они не

обладают хорошей адаптацией к перестройке полосы пропускания. Поэтому фильтры в блоке ФЦ 1 (см. рис. 12.11) проектируются для обеспечения согласованной фильтрации радиоимпульсов минимальной длительности $\tau_{\text{и}} = 1$ мс. Согласованная фильтрация импульсов длительностью более 1 мс выполняется в каждом канале ФДУ блоком рекурсивных цифровых фильтров ФЦ 2.

Минимальных вычислительных и аппаратных затрат в блоке фильтрации добиваются использованием последовательной децимации. Следовательно, фильтры в блоке ФЦ 1 представляют последовательное соединение простых фильтров. Необходимая полоса пропускания для прямоугольного импульса равна [94] $2\Delta f_{\text{ФЦ1}} = 0,72/\tau_{\text{и min}} = 720$ Гц. Если на удвоенной полосе пропускания ФЦ 1 обеспечивает подавление составляющих сигнала на 40 дБ, то выходная частота отсчетов может быть доведена до $f_{\text{д}} = 2,56 \cdot 1,44 = 3,68$ кГц. Отсюда общий коэффициент децимации будет не более $D = 120/3,68 = 32$. Так как коэффициент децимации должен быть нечетным и желательно его разложение на простые множители, то выбираем меньшее число, т. е. $D = 27$. Тогда отдельные коэффициенты децимации могут быть $D_1 = D_2 = D_3 = 3$ или $D_1 = 9, D_2 = 3$. Выбираем $D_1 = 9$ и проектируем КИХ-фильтр с импульсной характеристикой длиной $N = 17$. В этом случае в структурной схеме фильтра (см. рис. 12.6) исключается оперативная память (блок RAM), после каждого девятого такта информация считывается из RG2 и он обнуляется. Полоса пропускания фильтра равна $2\Delta f_1 = 6,6$ кГц, а требуемое быстродействие $\Pi = 120$ тыс. оп/с, так как при единичных коэффициентах за период дискретизации выполняется только одна операция сложения. Такое малое быстродействие позволяет строить фильтр на микросхемах КМОП серий К176 или К561, что более чем на два порядка снижает потребляемую мощность по сравнению с использованием микросхемы ТТЛ серий.

После децимации на 9 выходная частота отсчетов $f_{\text{д1}} \approx 13,3$ кГц. Анализ параметров первого фильтра показывает, что он используется только как дециматор, а согласованная фильтрация следует за ним уже на низкой частоте отсчетов. Например, если применить три звена КИХ-фильтров с $N_1 = 5, N_2 = N_3 = 9$, то на частоте $f_{\text{д1}} = 13,3$ кГц получим $2\Delta f_{\text{ФЦ1}} = 760$ Гц, что близко к требуемой полосе пропускания. На частотах $(30 \pm 2,2)$ кГц такой фильтр имеет затухание более 40 дБ и, следовательно, можно после трехзвенного фильтра вводить децимацию на $D_2 = 3$. Однако при согласованной обработке прямоугольного радиоимпульса его форма на выходе фильтра становится треугольной. И тогда, чтобы два рядом стоящих отсчета считать квадратичными, необходимо учитывать форму огибающей. Эту операцию можно выполнить интерполирующим звеном

$$s'_n = \left[\sum_{k=0}^2 s_{n-k} \cos(k\pi/2) \right] / 2. \quad (12.47)$$

Структурная схема интерполирующего звена приведения амплитуд показана на рис. 12.12. Такой интерполятор позволяет в один и тот же момент времени иметь квадратурные отсчеты, приведенные к одной амплитуде. Но в точке перехода огибающей через максимум алгоритм (12.47) дает ошибку вычисления: для нашего случая на частоте отсчетов $f_d = 4,4$ кГц ошибка будет порядка $\varepsilon_0 \leq 24 \%$, а на частоте отсчетов $f_d = 13,3$ кГц $\varepsilon_0 \leq 6 \%$. Следовательно, предварительно необходимо выполнить интерполяцию на частоте 13,3 кГц, а затем уже вводить децимацию на $D_2 = 3$.

Полная структурная схема цифровой обработки сигнала от каждой секции АС до ДФУ примет вид (рис. 12.13).

На выходе блока ФЦ 1 (см. рис. 12.11) получается в каждый момент времени 16 пар квадратурных отсчетов, частота следования которых $f_{д2} = 4,4$ кГц. Если все пятнадцать ДН формировать одним процессором, то его производительность будет порядка 12 млн. оп/с. Очевидно, необходимо распараллеливать операцию формирования ДН и для каждой пары ДН ставить свой процессор.

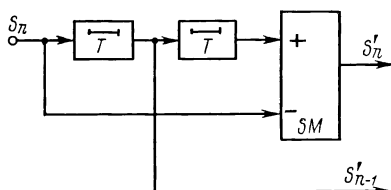


Рис. 12.12. Структурная схема интерполирующего блока приведения амплитуд.

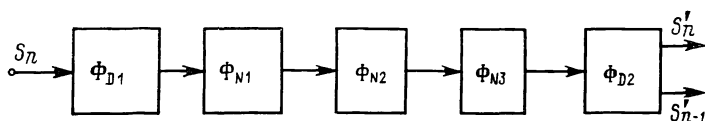


Рис. 12.13. Структурная схема ВО эхосигнала в отдельном канале от каждой секции АС.

Уменьшить объем ДФУ можно также, если фазирование выполнять не к краям АС (12.43), а к центру. Для АС с четным числом секций получим

$$\operatorname{Re} [\bar{L}(n, \theta_k)] = (1/M) \left\{ \sum_{m=1}^{M/2} [s'(n, -m) + s'(n, m)] \cos [(2m-1) \alpha_k/2] \pm \right. \\ \left. \pm (-1)^l [s'(n-1, -m) - s'(n-1, m)] \sin [(2m-1) \alpha_k/2] \right\}. \quad (12.48)$$

Здесь, по сравнению с (12.43) число операций умножения уменьшено вдвое за счет суммирования симметричных сигналов относительно центра АС.

Выполняя формирование ДН по (12.48), умножители целесообразнее ставить в канал, так как их число станет 8 вместо 16. В остальном структурная схема ДФУ не отличается от приведенной выше (см. рис. 12.10). Для сигналов, длительность которых

превышает 1 мс, окончательная фильтрация выполняется в ДН блоком ФЦ 2. Для этих целей целесообразнее всего использовать рекурсивные фильтры, так как в канале ДФУ нелинейность фазовой характеристики фильтра не имеет существенного значения. Если для $\tau_{\text{н}} = 1 \text{ мс}$ $2\Delta f_{\text{в.о}} = 720 \text{ Гц}$, то для $\tau_{\text{н}} = 16 \text{ мс}$ $2\Delta f_{\text{в.о}} = 45 \text{ Гц}$. Однако при такой узкополосной системе начинает сказываться эффект доплеровского смещения частоты. Собственное смещение, зависящее от скорости движения судна, можно учесть или при излучении, или изменением частоты дискретизации. Смещение частоты за счет радиальной скорости объектов поиска, когда неизвестна скорость объекта, приводит к расширению полосы пропускания СВО. Так, при скорости $v_p = 2 \text{ м/с}$ доплеровское смещение на частоте 30 кГц составит $\pm 80 \text{ Гц}$. Отсюда нецелесообразно иметь полосу пропускания тракта СВО менее 250 Гц.

Для вычисления амплитуды сигнала при аппаратурной реализации блока ВМ можно использовать упрощенный алгоритм вида

$$y_n = ({}^3/8) |s_n| + |s_{n-1}| \text{ при } |s_{n-1}| \geq |s_n|. \quad (12.49)$$

Вычисление по (12.49) дает ошибку в пределах «плюс» 7 % «минус» 3 % в зависимости от начальной фазы сигнала. Однако необходимо учитывать, как и при фазировании, неравенство амплитуд s_n -го и s_{n-1} -го отсчетов, иначе ошибка вычисления амплитудного значения возрастает до $\varepsilon = \pm 11 \%$. В предложенной структуре СПО с наибольшей скоростью работают АЦП и первый фильтр в блоке ФЦ 1. Но даже и они могут быть реализованы на микросхемах КМОП серий, что резко уменьшает энергопотребление системы. При этом СПО полностью решает задачу обнаружения объекта для рыбопоискового гидролокатора.

Глава 13

УСТРОЙСТВА ВТОРИЧНОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

§ 13.1. Цифровые устройства селекции эхосигналов на фоне импульсных помех

Рассмотренные в гл. 12 устройства пространственной и временной (частотной) фильтрации, осуществляющие первичную обработку эхосигналов, обеспечивают при соответствующих отношениях сигнал/шум выделение эхосигналов на фоне белого шума или близкого к нему по параметрам. Однако в реальных условиях обнаружение эхосигналов затрудняется вследствие маскирующего воздействия импульсных, реверберационных и других не изотропных помех. Процедуры, обеспечивающие ослабление влияния этих видов помех путем сопоставления эхосигналов, получаемых за несколько последовательных циклов излучения—приема, в отличие

от упомянутой фильтрации называют вторичной обработкой [41, 72]. Ко вторичной обработке относят также определение параметров объектов поиска (дальности, угловых положений, скорости, направления движения и т. п.).

Одним из наиболее широко используемых методов борьбы с импульсными помехами является метод накопления экосигналов, принимаемых за несколько последовательных циклов излучения—приема. Метод накопления используется с момента внедрения в РПА самопишущих регистраторов и электронных индикаторов

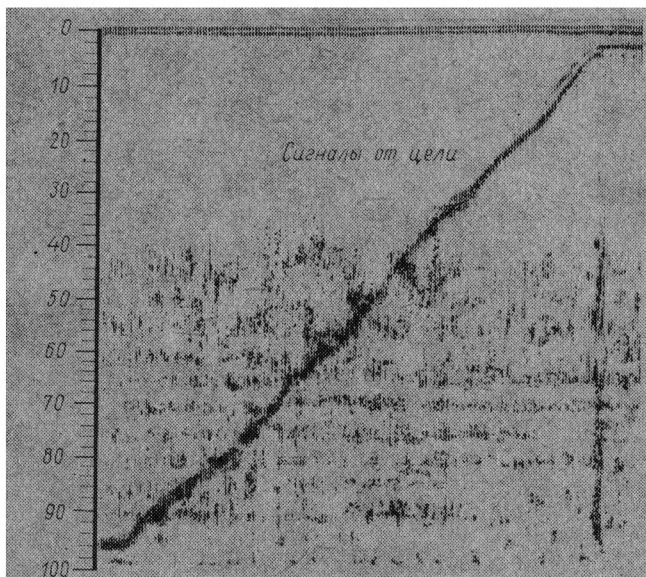


Рис. 13.1. Эхограмма от приближающейся одиночной цели, полученная с помощью параметрического гидролокатора ПГЛ-2А.

с яркостной отметкой и длительным послесвечением люминофора ЭЛТ. В регистраторах эффект накопления проявляется в формировании на эхограммной бумаге упорядоченной линии — трассы отметок экосигналов от цели при записи всех шумов и сигналов, принимаемых в течение нескольких последовательных циклов излучения—приема. Эта упорядоченность отметок экосигналов позволяет оператору зрительно выделить последние на фоне расположенных случайным образом отметок помех даже при одинаковой степени почернения всех отметок, т. е. при равенстве амплитуд экосигналов и помех [47].

Для иллюстрации на рис. 13.1 показана записанная на самописец эхограмма отражения от приближающейся одиночной цели, полученная с помощью параметрического гидролокатора ПГЛ-2А

[14]. Четко видна линия, соответствующая накопленному сигналу от цели. В электронных индикаторах с длительным послесвечением люминофора эффект накопления может проявляться за счет формирования трассы эхосигнала (при достаточно больших скоростях перемещения цели или судна) и поддержания высокой яркости отметки от цели (при неизменности ее положения на экране индикатора). Несмотря на улучшение в рассмотренных устройствах условий обнаружения эхосигналов, наличие на эхограммах регистраторов и экранах индикаторов отметок помех, сравнимых по степени почернения или яркости с отметками от объектов поиска, снижает наглядность представления информации и значительно повышает утомляемость оператора.

Применение в РПА полупроводниковых запоминающих устройств (ЗУ) большой емкости позволило осуществлять запоминание и хранение больших массивов данных, получаемых по крайней мере за два последовательных цикла излучения—приема. Возможность последующего многократного считывания запомненной информации допускает использование различных алгоритмов ее обработки, реализуемых цифровыми устройствами с жесткой структурой или программируемыми на основе микропроцессоров или микро-ЭВМ.

Один из простых алгоритмов, реализующих метод накопления с использованием полупроводниковых ЗУ, описывается следующим выражением:

$$\bar{A}(m) = (A_1 + A_2 + \dots + A_m)/m, \quad (13.1)$$

где $\bar{A}(m)$ —амплитуда эхосигнала или помехи на выходе устройства после обработки по m посылкам; A_1, A_2, A_m —амплитуды эхосигналов или помехи, принятых в 1-м, во 2-м и в m -м цикле приема—излучения.

При совпадении временных положений эхосигналов, принимаемых в каждой из m посылок, величина $\bar{A}(m)$ будет представлять собой среднее значение амплитуд этих эхосигналов. Величина амплитуды импульсной помехи, зафиксированной для определенной дистанции обнаружения только один раз за m посылок, в результате обработки по алгоритму (13.1) уменьшается в m раз [47, 66].

Вариант структурной схемы цифрового устройства, обеспечивающего выполнение алгоритма (13.1), представлен на рис. 13.2. Оперативное ЗУ, необходимое для накопления информации в течение заданного количества циклов излучения—приема, представляет собой набор из отдельных ЗУ $RAM1, RAM2$ и т. д. Коды амплитуд эхосигналов поступают на входы ЗУ через мультиплексор MS , который обеспечивает в каждом цикле излучения—приема поступление и запись информации только в одно определенное ЗУ. В следующем цикле излучения—приема вследствие изменения состояния счетчика CT , тактируемого импульсами запуска посылки, мультиплексор подключает для записи информации вход следующего по порядку ЗУ и т. д. При записи новой

информации предыдущая аннулируется. Смена ЗУ осуществляется циклически, обеспечивая таким образом как непрерывное обновление информации, так и возможность непрерывного ее считывания. Выходы всех ЗУ подсоединены к сумматору SM , осуществляющему суммирование кодов эхосигналов, принятых в течение t предшествующих циклов излучения—приема. С выхода сумматора цифровой код, соответствующий сумме амплитуд входных сигналов за t циклов, подается на арифметическое устройство деления на t (D/V_m), осуществляющее выравнивание весов

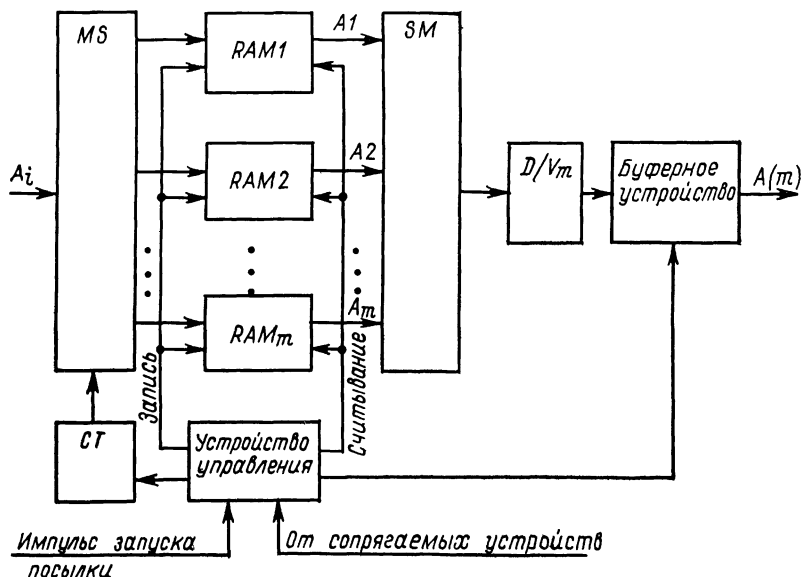


Рис. 13.2. Структурная схема устройства обработки сигналов по методу накопления с использованием запоминающих устройств.

разрядов кодов эхосигналов до обработки и после нее. Связь с последующими устройствами осуществляется через буферное устройство, которое может быть выполнено в виде вентильных схем, буферного регистра или шинного формирователя. Схема управления обеспечивает синхронизацию работы устройства обработки и, в частности, временное разделение процессов записи и считывания информации в ЗУ. Примерами устройств, использующих рассмотренный алгоритм обработки информации, могут служить устройство MS , разработанное фирмой «Simrad» как приставка к гидролокаторам [47], и гидролокатор Atlas Fishing Sonar 950 фирмы «Kjipr».

В гидролокаторах кругового и секторного обзоров, особенно при большом числе m , для реализации устройства обработки по схеме, приведенной на рис. 13.2, требуется набор ЗУ с большой суммарной емкостью. Это усложняет организацию всей системы

памяти и управление режимами ее работы, снижает надежность ее функционирования, удорожает стоимость аппаратуры. В этом случае более рационально применять устройства обработки с ЗУ, объем памяти которого обеспечивает запоминание информации, поступающей только за один цикл излучения—приема. В таких устройствах в каждом цикле излучения—приема осуществляется запоминание не вновь поступающей информации, а продукта ее предварительной обработки совместно с уже находящейся в ЗУ и обработанной в предыдущем цикле информацией.

Один из возможных вариантов структурной схемы устройства обработки с использованием одиночного ЗУ приведен на рис. 13.3.

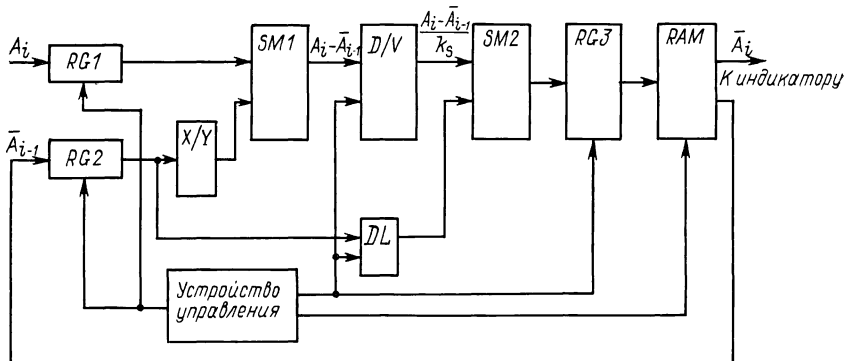


Рис. 13.3. Структурная схема устройства обработки сигналов по методу накопления с использованием одиночного ЗУ.

Приведенное устройство осуществляет обработку сигналов по алгоритму

$$\bar{A}_i = \bar{A}_{i-1} + (A_i - \bar{A}_{i-1})/k_c, \quad (13.2)$$

где \bar{A}_i — амплитуда эхосигнала или помехи, получаемая после обработки информации, принятой в i -м и предшествующих циклах; \bar{A}_{i-1} — амплитуда эхосигнала или помехи, полученная после обработки информации, принятой в $(i-1)$ -м и предшествующих циклах; A_i — амплитуда эхосигнала или помехи, принятых в i -м цикле излучения—приема; k_c — коэффициент обработки сигнала, определяющий степень уменьшения амплитуды одиночной импульсной помехи (целое положительное число).

Работа устройства осуществляется следующим образом. В регистр $RG1$ поступает цифровая информация с тракта первичной обработки, а в регистр $RG2$ — с запоминающего устройства RAM. Для обеспечения операции вычитания между регистром $RG2$ и сумматором $SM1$ введен преобразователь x/y прямого кода в дополнительный. Полученная разность в устройстве арифметического деления D/V делится на коэффициент k_c и затем суммируется с поступающей через цифровую линию задержки DL информацией из регистра $RG2$. Задержка осуществляется на столько

тактов, сколько необходимо для выполнения деления в устройстве D/V . Окончательный результат \bar{A}_i через буферный регистр $RG3$ поступает на запись в память, заменяя там предшествующую информацию.

Процессы изменения амплитуд экосигналов и помех в результате обработки в рассмотренном устройстве для двух значений k_c и при равенстве амплитуд экосигналов и помех приведены на рис. 13.4. На рисунке вертикальные линии соответствуют амплиту-

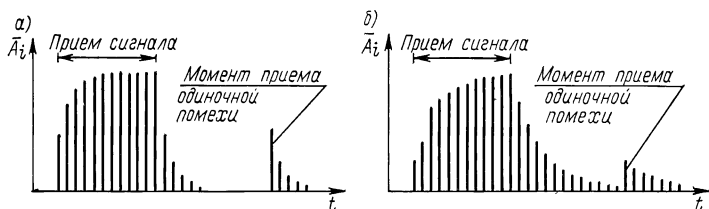


Рис. 13.4. Изменение амплитуд сигнала и помехи в каждом цикле излучения—приема на выходе устройства обработки, реализующего алгоритм (13.2): а — $k_c = 2$; б — $k_c = 4$.

дам сигналов и помех, коды которых записываются в одну и ту же ячейку памяти при каждом последовательном цикле излучения—приема.

Кроме устройств, использующих метод накопления экосигналов, для борьбы с импульсными помехами в РПА применяются также

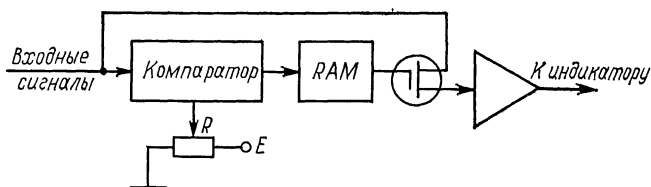


Рис. 13.5. Структурная схема устройства обработки сигналов, использующего принцип совпадения пространственного или временного положения экосигналов в двух последовательных циклах излучения—приема.

устройства, работающие на принципе совпадения пространственного или временного положения экосигналов от одной и той же цели в двух последовательных циклах излучения—приема. Упрощенная структурная схема устройства такого типа, примененного в гидролокаторах FSS-32B и FSS-75B фирмы «Fugipon», приведена на рис. 13.5. Входные сигналы, прошедшие первичную обработку, поступают на компаратор, который выделяет сигналы с амплитудой, превышающей порог отсечки шумов, устанавливаемый переменным резистором R . Кроме того, в компараторе осуществляется преобразование выделенных сигналов в цифровую форму для подачи их в запоминающее устройство RAM. В следующем цикле

приема синхронно с приемом новой серии эхосигналов осуществляется опрос запоминающих ячеек в той же последовательности, в которой производилась запись. При наличии в ячейке ЗУ ненулевого кода эхосигнала на выходе RAM вырабатывается сигнал, открывающий ключ на полевом транзисторе. Если на входе устройства в данный момент присутствует эхосигнал, он подается через усилитель на индикатор. Если в предыдущем цикле в опрашиваемой ячейке ЗУ был записан нулевой код (сигнал отсутствовал), на выходе RAM вырабатывается сигнал, закрывающий ключ. Как в том, так и в другом случае сигнал отобразится на индикаторе только в том случае, если он будет присутствовать и в первом и во втором циклах. Таким образом, обеспечивается подавление импульсных помех, распределенных случайным образом.

В заключение следует отметить, что все рассмотренные устройства обработки эффективны только в том случае, если в течение всех требуемых для обработки циклов излучения—приема не происходит значительного изменения пространственного положения цели относительно судна. При больших скоростях судна или цели для того, чтобы не допустить пропусков полезных эхосигналов должна обеспечиваться компенсация смещения цели. Такая компенсация возможна только при использовании специального вычислительного устройства с применением микропроцессоров или микроЭВМ.

§ 13.2. Устройства выделения эхосигналов на фоне непрерывной помехи

Во многих практических случаях необходимо обеспечивать выделение эхосигналов от целей на фоне непрерывной во времени помехи при сравнительно небольшом превышении амплитуды полезного сигнала уровня огибающей помехи. Помеха может представлять собой например, поверхностную реверберацию при слежении за объектом на близких расстояниях, объемную реверберацию при поиске объектов на предельных дистанциях, шумы винта при работе в кормовых секторах обзора. Хотя в этом случае оператор РПА имеет возможность отличить на экране индикатора или на эхограмме регистратора полезный сигнал от помехи, при длительном наблюдении оператор сильно утомляется, и повышается вероятность пропуска эхосигнала от цели.

Теоретически, если бы закон ВАРУ (или АРУ) точно компенсировал закон изменения огибающей помехи, оператор мог бы установить такой коэффициент усиления приемного тракта, чтобы напряжение поступающей на вход индикатора или регистратора помехи было несколько ниже их порога чувствительности. В этом случае оператор мог бы наблюдать только полезные эхосигналы даже при незначительном превышении ими уровня помехи без утомляющего воздействия отметок помех. Однако на практике такого соответствия добиться почти невозможно из-за неповторяю-

щихся от цикла к циклу флуктуаций огибающей помехи и изменения интенсивности помехи с течением времени. Кроме того, при небольших соотношениях сигнал/помеха яркость или контраст отметок сигнала на индикаторе или регистраторе были бы малы, что также ухудшило бы условия работы оператора при длительном наблюдении.

Таким образом, желательно, сохраняя высокую яркость или контраст отметки эхосигнала, обеспечить устранение на экране индикатора или эхограмме отметок шумового фона. Наиболее просто эту задачу можно решить с помощью пороговых устройств, в которых величина порога устанавливается вручную оператором. На выходе таких устройств сигнал появляется только в том случае, если его амплитуда превышает установленное значение порогового напряжения.

Примером использования ручной установки порога может служить аналоговое устройство отсеки шумов, являющееся составной частью устройства обработки сигналов, приведенного на рис. 13.5 и состоящее из компаратора, источника опорного напряжения E и переменного резистора R . В цифровых трактах обработки сигналов пороговые устройства можно реализовать, используя интегральные цифровые компараторы. В этом случае двоичный код входного сигнала сравнивается с двоичным кодом порогового напряжения, способ выработки которого зависит от типа органа управления установкой порога. При использовании переменного резистора (аналогично устройству на рис. 13.5) преобразование постоянного напряжения в двоичный код может осуществляться низкоскоростным АЦП, обслуживающим только это устройство, или быстродействующим мультиплексируемым АЦП, обеспечивающим в режиме разделения времени цифровое преобразование аналоговых величин и других устройств РПА. Установка величины порога может осуществляться коммутационными элементами, например, трехпозиционным тумблером с фиксацией в нейтральном положении или двумя нефиксируемыми кнопками. С их помощью на один из входов реверсивного двоичного счетчика подаются тактовые импульсы, обеспечивая возрастание или убывание на его выходах величины кода. При отпускании кнопки или тумблера состояние счетчика, а соответственно и код величины порога фиксируются.

Устройства с ручной установкой порога достигают максимальной эффективности при обеспечении в течение всего цикла приема постоянства амплитуды огибающей помехи на выходе тракта первичной обработки эхосигналов. В реальной аппаратуре, несмотря на действие устройства ВАРУ, амплитуда огибающей помехи за время от окончания излучения до окончания приема может изменяться в довольно широких пределах, особенно при одновременном воздействии нескольких видов помех. Это наиболее заметно при зондировании в кормовом секторе обзора, так как в результате воздействия ВАРУ постоянный уровень винтовых помех на выходе тракта первичной обработки заменяется в значительных

пределах. В этом случае при установке порога, обеспечивающего отсеку помех с максимальной амплитудой, полезные сигналы, которые могли бы быть обнаружены на участках дистанции с более низким уровнем помех, отсекаются пороговым устройством. Снижение порогового уровня вызывает увеличение количества отметок помех на эхограмме или экране электронного индикатора.

Более высокой эффективностью обладают устройства, осуществляющие автоматическую регулировку величины порогового уровня или общего коэффициента усиления приемного тракта таким образом, чтобы амплитуда помехи оставалась меньше порогового уровня в течение всего цикла приема. С целью обеспечения индикации возможно более слабых эхосигналов разница между этими уровнями должна быть минимальна. Предпочтительным является вариант с регулировкой порога, так как в этом случае на выходе устройства обработки сохраняется соответствие амплитуды эхосигнала размеру цели в то время, как при регулировке коэффициента усиления требуется дополнительное устройство компенсации действия АРУ (см. § 8.6).

В обоих случаях требуется устройство, обеспечивающее возможно более точное предсказание значений амплитуд огибающей помехи на выходе тракта первичной обработки эхосигналов для различных моментов времени, прошедших после окончания излучения. В качестве исходной величины для выработки наиболее вероятного в текущем цикле приема закона распределения амплитуд огибающей помехи в зависимости от времени прошедшего с момента окончания излучения можно использовать среднее значение амплитуды помехи для каждой точки временной оси за несколько циклов излучения—приема. Для уменьшения влияния случайных выбросов амплитуды огибающей усреднение должно производиться за большой промежуток времени, соответствующий нескольким десяткам циклов излучения—приема, или в случае многолучевой РПА — по большому числу угловых положений приемной ДН.

Закон распределения средних значений амплитуд огибающей помехи непрерывно изменяется вследствие изменения гидрологических условий, состояния поверхности моря, рельефа дна, пространственной ориентации ДН, режима движения судна и других факторов. Это вызывает необходимость периодической корректировки вырабатываемого закона.

Для хранения данных об амплитудных параметрах сигналов рассматриваемые устройства должны иметь в своем составе запоминающие устройства, объем памяти которых зависит от используемого алгоритма усреднения. Очевидно, что максимальный объем памяти требуется при использовании описанного ранее алгоритма вычисления среднего арифметического амплитуды принимаемого сигнала (13.1), так как в этом случае в запоминающем устройстве необходимо хранить всю информацию, получаемую за большое количество циклов излучения—приема. Значительное уменьшение объема памяти дает использование рекурсивных алго-

ритмов, примером которых может служить приведенное ранее выражение (13.2). При установке в устройстве, реализующем такой алгоритм, значений k_c , равных 16 и более, достигается приемлемая степень подавления случайных выбросов амплитуды огибающей помехи. Так, например, при $k_c = 16$ и одиночном выбросе амплитуды помехи, превышающем средний уровень помехи в 4 раза, величина фиксируемого в устройстве среднего уровня возрастает только на 19 %. Для получения такого же эффекта в устройстве, реализующем алгоритм (13.1), потребовался бы в 16 раз больший объем памяти. Кроме того, в первом случае величина среднего уровня помехи, начиная со следующего цикла излучения—приема, плавно возвращается к первоначальному значению. Во втором же случае величина превышения среднего уровня остается постоянной в течение 16 циклов излучения—приема, после чего средний уровень скачком принимает свое первоначальное значение. По-видимому, для устройств, обеспечивающих выработку адаптивного порога или АРУ, более перспективными являются рекурсивные алгоритмы.

Ранее отмечалось, что среднее значение амплитуды огибающей помехи используется только как исходная величина для выработки величины порога или текущего значения величины коэффициента усиления приемного тракта. Так как помеха является случайным процессом, амплитуда помехи в конкретный момент времени может и превышать и быть меньше выработанного среднего уровня. Как и величина среднего уровня, величины этих отклонений зависят от многих факторов. При использовании в качестве величины порога среднего уровня помехи выбросы помехи, превышающие этот порог, будут фиксироваться на индикаторе (регистраторе), и эффективность использования порогового устройства снизится. Для устранения этого явления величина порога U_{Π} должна выбираться, исходя из следующего выражения:

$$U_{\Pi} = k_m \bar{A}, \quad (13.3)$$

где k_m — масштабный множитель ($k_m > 1$), зависящий от статистических параметров помехи; \bar{A} — среднее значение амплитуды огибающей помехи. При аппаратурной реализации для оптимизации величины порога в конкретных промысловых условиях должна обеспечиваться возможность оперативного изменения величины k_m .

Следует заметить, что для однолучевой РПА возможна ситуация (например, при замете кошелькового невода или эхолотировании на стопе судна), при которой дистанция до цели остается постоянной длительное время, а ось ДН непрерывно ориентируется на цель. В этом случае устройство формирования адаптивного порога или сигнала АРУ не может «отличить» цель от помехи, и цель, появившись на короткое время, постепенно исчезнет с экрана индикатора. Такой же эффект возможен и в многолучевой РПА, в которой для каждого пространственного канала (луча) предусмотрен отдельный формирователь порога или отдель-

ное устройство АРУ. В однолучевой РПА поддержание контакта с целью в этом случае можно обеспечить путем установки величины $k_M < 1$ после того, как цель будет обнаружена, классифицирована и выяснится, что дистанция до цели будет оставаться постоянной. В многолучевой РПА можно воспользоваться тем, что цель перекрывается малой частью сектора обзора — в большинстве случаев одной или двумя ДН. Если для каждого дискретного значения дистанции формировать порог, используя сигналы, при-

нимаемые с этой дистанции в достаточно большом числе пространственных каналов, воздействие более высокого уровня эхосигналов от цели на величину вырабатываемого порога незначительно. В результате будет обеспечено необходимое превышение амплитуды сигнала цели, подаваемого на индикатор, над вырабатываемым пороговым напряжением.

В качестве примера рассмотрим устройство формирования адаптивного порога (ФАП), которое использовалось в опытных образцах рыбопоискового гидролокатора кругового обзора «Угорь». Структурная схема этого устройства приведена на рис. 13.6. В состав

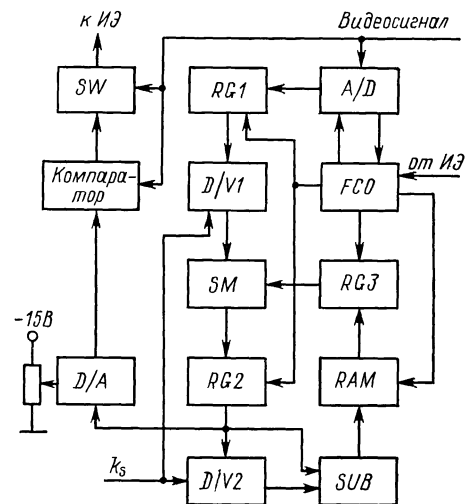


Рис. 13.6. Структурная схема устройства формирования адаптивного порога гидролокатора «Угорь».

устройства ФАП включен аналого-цифровой преобразователь (АЦП) A/D , который осуществляет преобразование видеосигналов, предназначенных для подачи на электронный индикатор, в цифровой код. Преобразование осуществляется каждые 24 мкс, что соответствует повороту приемной ДН на 5° . После окончания преобразования код величины видеосигнала записывается в буферный регистр $RG1$. Полученные коды подвергаются в устройстве ФАП обработке по следующему алгоритму:

$$\bar{A}_i = A_i/k_c + M_{i-1}, \quad (13.4)$$

где \bar{A}_i — усредненное значение амплитуды огибающей сигналов, полученное после обработки в i -м цикле; A_i — амплитуда огибающей сигнала, принятого в i -м цикле; k_c — коэффициент обработки сигнала (целое положительное число), определяющий степень уменьшения влияния случайных выбросов амплитуды помехи; M_{i-1} — числовое выражение содержимого оперативного запомина-

шего устройства RAM, записанное в $(i-1)$ -м цикле. Величина M_{i-1} определяется в свою очередь выражением

$$M_{i-1} = A_{i-1}/k_c + M_{i-2} + (A_{i-1}/k_c + M_{i-2})/k_c, \quad (13.5)$$

где A_{i-1} — амплитуда огибающей сигнала, принятого в $(i-1)$ -м цикле; M_{i-2} — числовое выражение содержимого RAM, записанное в $(i-2)$ -м цикле. Очевидно, что член $A_{i-1}/k_c + M_{i-2}$ соответствует члену A_{i-1} в выражении (13.2), и, следовательно, алгоритм обработки, описываемый выражениями (13.4) и (13.5), является одним из вариантов алгоритма (13.2).

Записанный в регистре $RG1$ цифровой код величины A_i поступает на первое устройство арифметического деления $D/V1$, осуществляющее деление величины A_i на коэффициент k_c , который может устанавливаться равным 2, 4, 8 или 16. Код величины A_i/k_c поступает далее на сумматор SM . Одновременно с началом очередного цикла преобразования АЦП A/D производится выборка кода величины M_{i-1} из RAM по адресу, соответствующему дистанции, с которой в данный момент времени осуществляется прием эхосигналов. Этот код записывается в буферный регистр $RG3$, выходы которого подсоединены к сумматору SM . Сумматор обеспечивает выполнение операции арифметического сложения кодов величин A_i/k_c и M_{i-1} . С выхода сумматора код величины $A_i/k_c + M_{i-1}$ поступает на буферный регистр $RG2$, запись в который осуществляется после окончания очередного цикла АЦП. Код суммы фиксируется в регистре $RG2$ и с его выходов подается на цифроаналоговый преобразователь (ЦАП) D/A , второе устройство арифметического деления $D/V2$ и устройство арифметического вычитания SUB . После арифметического деления в $D/V2$ на коэффициент k_c суммы, определяемый выражением (13.4), в устройстве арифметического вычитания SUB выполняется операция, описываемая выражением (13.5). Код результата этой операции после фиксации в $RG3$ величины M_{i-1} записывается в ту ячейку RAM, из которой было произведено считывание этой величины. Вновь записанный код используется в следующем цикле выполнения алгоритма (13.4). Адрес ячейки RAM остается неизменным до тех пор, пока приемная ДН не совершит поворот на 360° . В результате этого за один оборот ДН осуществляется усреднение амплитуд огибающей помехи, принимаемых с определенной дистанции по 72 различным направлениям, и запись кода средней величины амплитуды помехи, соответствующей этой дистанции, в одну ячейку памяти. Если в одном из направлений на этой дистанции находится рыбный косяк, то даже при относительно большой амплитуде эхосигнала от косяка величина вырабатываемого среднего уровня помехи незначительно отличается от действительного среднего уровня помехи. После завершения полного оборота ДН формирователь управляющих импульсов FCO вырабатывает новый адрес (на единицу больше предыдущего) и определение средней величины помехи производится для следующего дискретного значения дистанции. После окончания развертки электронного

индикатора импульсом гашения обратного хода развертки, поступающим на формирователь *FCO*, осуществляется установка начального адреса *RAM*. Помимо этого формирователь *FCO* обеспечивает синхронизацию режимов работы АЦП, всех буферных регистров и режимов считывания и записи *RAM*.

Код величины среднего уровня помехи, поступающий с регистра *RG2*, преобразуется ЦАП *D/A* в аналоговое напряжение, которое в качестве порогового напряжения поступает на первый вход компаратора. На второй вход компаратора подается видеосигнал с выхода приемно-усилительного тракта. В случае, если видеосигнал превышает по величине пороговое напряжение, компаратор вырабатывает управляющее напряжение, открывающее ключ *SW*. Таким образом, на индикатор с выхода ключа поступают и соответственно индицируются только эхосигналы, превышающие пороговое напряжение. Для обеспечения возможности оперативного изменения величины k_m , согласно выражению (13.3), предусмотрено изменение масштаба порогового напряжения путем регулировки величины опорного напряжения, подаваемого на ЦАП.

К недостатку рассмотренного устройства следует отнести обобщенность вырабатываемого закона распределения помехи для всех направлений локации, в то время как в действительности для носового и кормового секторов обзора эти законы различаются из-за отличия статистических характеристик помех в этих секторах.

§ 13.3. Устройства селекции донных эхосигналов

Практически все современные рыбопоисковые эхолоты имеют специальные устройства, обеспечивающие выделение эхосигналов от объектов, находящихся в непосредственной близости от морского дна. В применении к регистраторам такие устройства и соответствующие способы представления информации получили наименование «Белая линия», «Серая линия», «Контурная линия» [47]. Широкое распространение получили также устройства «Привязки к грунту», позволяющие воспроизводить на регистраторах и электронных индикаторах в крупном масштабе эхосигналы от рыб, находящихся в узком придонном слое [47]. В состав многих рыбопоисковых эхолотов вводятся устройства измерения глубины под килем судна с ее индикацией на цифровом индикаторе (эхолоты Atlas Fischfinder 791DS фирмы «Krupp» и ET100 фирмы «Simrad») или на экране ЭЛТ (эхолоты FCV-121 фирмы «Furuno» и CVS-881B фирмы «Koden»). Перечисленные устройства освобождают оператора при необходимости получения информации о глубине моря от затрат времени на выполнение соответствующих операций со шкалами приборов эхолота и повышают точность отсчета глубин. При работе судна в промысловом районе с безопасными глубинами в этом случае возможно обеспечение навигационных задач без включения специального навигационного эхолота, что увеличивает его срок службы и снижает затраты электроэнергии.

Основным и обязательным узлом рассмотренных устройств является селектор донных эхосигналов, позволяющий из всей последовательности принимаемых сигналов и помех выделить эхосигнал от границы раздела вода—морское дно. В качестве основного признака, позволяющего различать эхосигналы от дна и рыб, используется значительное превышение амплитудой донных эхосигналов амплитуд эхосигналов от рыбных объектов, возникающее вследствие существенной разницы в силе цели дна и рыбных объектов. Названный признак является единственным в аналоговых устройствах РПА, осуществляющих обработку сигналов в реальном масштабе времени. В этом случае селектор представляет собой пороговое устройство, выполненное в виде компаратора, уровень срабатывания которого устанавливается вручную оператором (эхолоты «Прибой-101», «Сарган-ЭМ», «Пескарь»). Регулировка порога осуществляется таким образом, чтобы его величина превышала амплитуды эхосигналов от рыбных объектов, но была меньше амплитуд эхосигналов от дна с учетом их флуктуаций. Необходимость выполнения указанной регулировки требует от оператора определенного практического навыка и периодической подстройки порога. К недостатку таких устройств следует также отнести подверженность воздействию импульсных помех и эхосигналов от рыбных косяков большой плотности.

Более надежную селекцию донных эхосигналов обеспечивают цифровые устройства, осуществляющие поиск и идентификацию донных эхосигналов с учетом информации, получаемой в течение нескольких последовательных циклов излучения—приема. В таких устройствах используются дополнительные признаки, присущие эхосигналам от дна: наличие донных эхосигналов в каждом цикле приема (при глубине дна, входящей в диапазон работы эхолота) и относительно малое изменение дистанции до дна в соседних циклах зондирования. Эти свойства позволяют повысить помехозащищенность селектора донных эхосигналов путем амплитудной селекции эхосигналов не во всем диапазоне работы эхолота, а только в узком участке (стробе) диапазона, охватывающем предполагаемое местоположение донного эхосигнала. Введение автоматического слежения центра строба за донным эхосигналом дополнительно улучшает помехозащищенность за счет возможности уменьшения величины строба.

При выборе величины строба должны учитываться возможные изменения глубины моря при движении судна. Между моментами приема донных эхосигналов в двух последовательных циклах зондирования (это время приблизительно равно периоду зондирования T_{Π}) глубина дна изменяется на величину

$$\Delta h = v_c T_{\Pi} \operatorname{tg} \alpha, \quad (13.6)$$

где V_c — скорость судна; α — угол наклона профиля дна в вертикальной плоскости, проходящей через вектор скорости судна. Если алгоритм работы селектора предусматривает на каком-либо его этапе неизменность временного положения строба в течение t

циклов зондирования, следует учитывать, что величина Δh в этом случае увеличивается в m раз. Глубина дна, измеренная в различных циклах приема, может также вследствие вертикального смещения судна при волнении отличаться на некоторую величину h_b . С учетом того, что глубина моря при движении судна может как возрастать, так и уменьшаться, для определения длительности импульса строга необходимо пользоваться следующим выражением:

$$T_c \geq 4 (mv_c T_n \operatorname{tg} \alpha + h_b) / c. \quad (13.7)$$

Использование межцикловой обработки эхосигналов позволяет улучшить также работу амплитудного селектора (остающегося основной частью селектора донных эхосигналов) путем автоматической подстройки величины порога при колебаниях амплитуды донного эхосигнала и исключить помимо этого операцию ручной установки порога.

Примером устройства, в котором использованы рассмотренные принципы, является селектор донного эхосигнала эхолота Atlas Fischfinder 791DS фирмы «Kgrupp». В этом устройстве величина порога амплитудного селектора автоматически устанавливается равной приблизительно $1/3$ средней величины амплитуд максимальных эхосигналов, полученных за несколько последних зондирований. В установившемся режиме эхосигналы, амплитуда которых превышает установленную для данного цикла величину порога, поступают на вентильную схему, которая открывается стробирующим импульсом на время, обеспечивающее прием сигналов с глубин равных $(H \pm 10)$ м, где H — глубина дна, полученная в предыдущем цикле приема. В случае отсутствия на выходе вентильной схемы в восьми следующих один за другим циклах зондирования эхосигналов, превышающих установленный порог, счетчик количества последовательных циклов, в которых не зарегистрирован донный эхосигнал, открывает вентильную схему на полный период зондирования. Значение глубины, соответствующей эхосигналу с максимальной амплитудой, запоминается как центральная точка стробирующего импульса для следующего цикла зондирования. Для устранения влияния так называемой «нулевой» помехи донный селектор начинает работать через 10 мс после начала импульса излучения (длительность излучаемых импульсов 1 или 3 мс).

Алгоритм работы рассмотренного селектора не является оптимальным. В частности, при переходе селектора в режим поиска максимального сигнала в полном периоде зондирования возможна привязка строга к одиночной импульсной помехе с амплитудой, превышающей амплитуду донного эхосигнала. В этом случае селектор в течение восьми циклов излучения — приема не будет обеспечивать выдачу информации о положении донного эхосигнала. Если помеха представляет собой зондирующие посылки другого близко расположенного рыбопоискового прибора (на этом же или другом судне), после окончания восьмого цикла возможна повтор-

ная привязка строба к новому временному положению помехи. Таким образом, в результате воздействия помехи такого вида возможно длительное нарушение нормальной работы селектора.

При больших флюктуациях амплитуды донного эхосигнала возможен также случайный захват стробом импульсной помехи в любом из восьми циклов, следующих за моментом исчезновения в пределах строба донного эхосигнала с достаточной для срабатывания амплитудного селектора амплитудой. Ложный захват может возникнуть при совпадении края строба с моментом появления импульсной помехи, превышающей установленный порог. В следующем цикле приема центр строба совместится с местоположением этой импульсной помехи. Если смещение местоположения донного эхосигнала в этом цикле (вследствие изменения глубины моря или из-за вертикального смещения судна на волнении) противоположно смещению строба, также произойдет потеря эхосигнала на длительное время.

Более эффективная защита от воздействия мощных импульсных помех достигается в устройстве селекции донных сигналов (СДС), входящем в состав опытного образца эхолота «Таймень». Устройство СДС осуществляет автоматический поиск и слежение за донным эхосигналом в четырех режимах работы. Режим «А» по протяженности составляет один цикл излучения—приема и используется в первый момент после включения эхолота и при невыполнении определенных условий в режимах «В» и «D». В режиме «А» производится поиск сигнала с максимальной амплитудой в пределах всего установленного диапазона эхолотирования за исключением начального участка, равного четырем длительностям зондирующего импульса. Параллельно этому процессу осуществляется запоминание кода, соответствующего половине амплитуды максимального эхосигнала, а также кода дистанции, с которой был принят этот эхосигнал.

В следующем цикле приема сигналов устройство СДС переходит в режим «В», в котором поиск сигнала с максимальной амплитудой ведется во временном стробе, равном по величине $1/16$ зафиксированной длительности предыдущего цикла излучения—приема, и с центром, совпадающим с временным положением сигнала с максимальной амплитудой в предыдущем цикле. В этом режиме и в режимах «С» и «D» временной селекции предшествует амплитудная селекция с порогом, равным половине амплитуды максимального эхосигнала, выделенного в предыдущем цикле приема. При наличии в стробе сигналов, превышающих установленный порог, в следующем цикле приема центр строба совмещается с временным положением сигнала с максимальной амплитудой, а величина порога устанавливается равной половине этой амплитуды. Наличие в восьми последовательных циклах приема режима «В» эхосигналов, прошедших амплитудную и временную селекцию, обеспечивает перевод устройства СДС в режим «С». При отсутствии в стробе сигналов, превышающих порог, устройство СДС возвращается в режим «А».

В режимах «А» и «В» информация о наличии донного эхосигнала в другие устройства эхолота не выдается. Большое количество циклов режима «В», отведенное на принятие решения о захвате в строб эхосигнала от дна, уменьшает вероятность выдачи ложной информации о наличии донного эхосигнала при глубине моря, большей диапазона работы эхолота. Переход из режима «В» в режим «А» после первого же «пустого» цикла уменьшает по сравнению с рассмотренным выше эхолотом время ложного захвата, осуществленного под воздействием импульсной помехи.

В режиме «С» функционирование устройства СДС аналогично режиму «В», а максимальный по амплитуде сигнал, прошедший амплитудную и временную обработки, выводится в качестве донного эхосигнала на другие устройства эхолота. В случае отсутствия в стробе сигналов, превышающих установленный амплитудный порог, устройство СДС начинает работать в режиме «D».

В этом режиме, в отличие от режима «С» поиск сигнала, превышающего амплитудный порог, осуществляется в стробе, ширина которого составляет $1/8$ длительности предыдущего цикла излучения—приема. Центр этого строба совмещается с центром строба последнего цикла режима «С», а величина порога сохраняется равной порогу, установленному в этом же цикле. Если в расширенном стробе режима «D» будет принят сигнал, превышающий ранее установленный порог, устройство возвратится в режим «С». При отсутствии в четырех последовательных циклах приема сигналов, превышающих порог, устройство переходит в режим «А». Расширение строба в режиме «D» устраняет возможность случайного захвата стробом импульсной помехи при противоположных направлениях перемещения центра строба и донного эхосигнала (как было показано для рассмотренного выше эхолота).

На рис. 13.7 приведена упрощенная (без формирователей режима и импульсов сброса) функциональная схема устройства СДС, поясняющая принцип его работы в режиме «С». Устройство содержит два взаимосвязанных канала обработки информации, поступающей с цифровых устройств приемного тракта эхолота. Коды амплитуд эхосигналов через схему совпадений *И1*, управляемую формирователем строба приема *FCR*, подаются на регистр текущего сигнала *RG4*. Запись кодов в этот регистр обеспечивается синхри импульсами «СИ», поступающими также из приемного тракта. Если очередной записанный код A_i текущего сигнала превышает по величине код, хранящийся в регистре максимального сигнала *RG5*, срабатывает компаратор 5. Сигнал $A_i > A_m$ с выхода компаратора 5 поступает на управляющий вход регистра *RG5*, в результате чего осуществляется запись нового (большего) значения кода сигнала в *RG5*. Таким образом, в режиме «С» по окончании строба приема, поступающего с формирователя *FCR* на вход *И1*, обеспечивается запись и хранение в регистре *RG5* кода самого большого по амплитуде эхосигнала, принятого за время существования строба. Код этой величины, уменьшенный

в два раза (путем смещения на один разряд в сторону младших разрядов), непосредственно перед началом следующего цикла приема записывается в регистр амплитудного порога $RG6$. Пере-запись обеспечивается подачей на $RG6$ управляющего импульса, формируемого схемой совпадения $И2$ при поступлении на один из ее входов импульса запуска посылки эхолота $T_{з.п}$ и наличии на втором входе сигнала разрешения с выхода триггера $T2$.

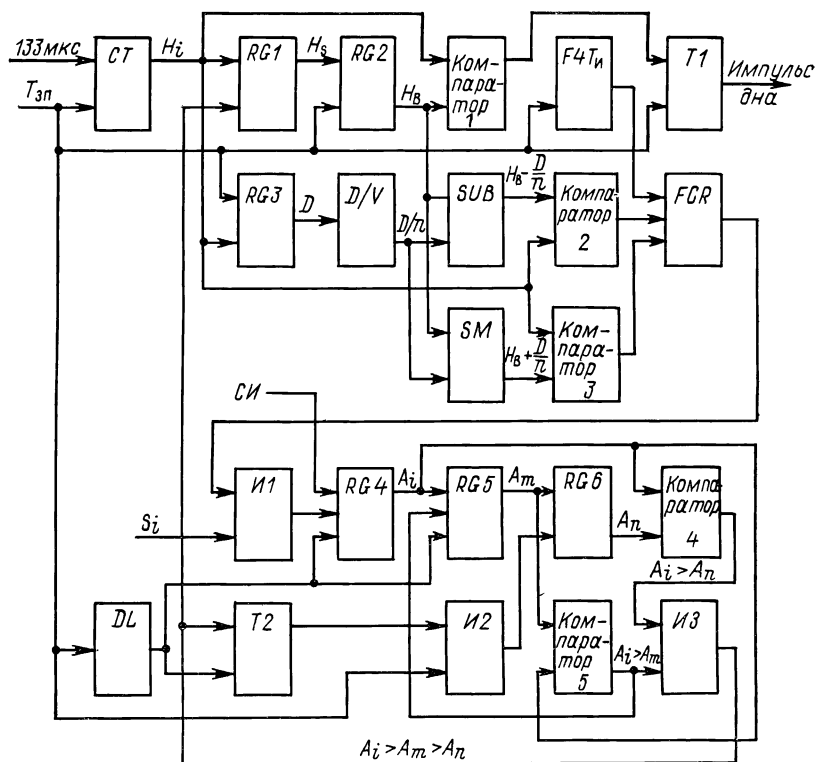


Рис. 13.7. Функциональная схема устройства СДС эхолота «Таймень» для режима «С».

В компараторе 4 производится сравнение кода A_i с кодом амплитудного порога A_n , хранящемся в регистре $RG6$. В случае превышения кодом A_i кода A_n на выходе компаратора 4 формируется сигнал $A_i > A_n$. При одновременном присутствии на входах схемы совпадения $И3$ сигналов $A_i > A_m$ и $A_i > A_n$ на выходе $И3$ формируется сигнал $A_i > A_m > A_n$. Этот сигнал устанавливает триггер $T2$ в состояние, обеспечивающее запись в $RG6$ в начале следующего цикла приема нового кода амплитудного порога. В случае отсутствия за время существования строба приема сигналов $A_i > A_m > A_n$ триггер $T2$, сброшенный в нулевое состояние в начале цикла импульсом $T_{з.п}$, задержанным схемой задержки DL ,

запрещает запись нового амплитудного порога в $RG6$ (режим «D»). Схема задержки DL обеспечивает, кроме того, сброс регистров $RG4$ и $RG5$ в нулевое состояние только после смены информации в $RG6$.

Сигналы $A_i > A_m > A_n$ поступают также на управляющий вход регистра $RG1$, в результате чего со счетчика CT текущей глубины H_i в $RG1$ записывается код глубины H_s , с которой был принят соответствующий сигнал A_i , превышающий установленный порог. На счетный вход счетчика CT поступают импульсы с периодом следования 133 мкс, что обеспечивает запись кода глубины с дискретностью 0,1 м. Последний (если их было несколько) за время существования строба приема сигнал $A_i > A_m > A_n$ обеспечивает запись в $RG1$ кода глубины, которая идентифицируется как глубина моря в текущем цикле приема. Перед началом следующего цикла приема передним фронтом импульса $T_{з.п}$ код H_s с $RG1$ переписывается в регистр кода глубины дна $RG2$. В этот же момент со счетчика CT в регистр диапазона $RG3$ переписывается код диапазона измеряемых глубин. После этого задним фронтом импульса $T_{з.п}$ (соответствующим началу излучения зондирующего импульса) счетчик CT устанавливается в нулевое состояние. Код глубины дна H_b поступает на вход компаратора 1. На другой вход компаратора подается код текущей глубины H_i . В момент равенства этих кодов на выходе компаратора 1 формируется импульс, устанавливающий триггер $T1$ в состояние «1». В результате на выходе триггера $T1$ формируется импульс, соответствующий по времени появления экосигналу от дна. Сброс триггера $T1$ осуществляется импульсом $T_{з.п}$.

Код диапазона измеряемых глубин D , хранящийся в $RG3$, поступает на устройство арифметического деления D/V , в котором посредством сдвига разрядов осуществляется деление на коэффициент n , определяющий какая часть диапазона составляет половину ширины строба приема (в режиме «С» $n = 32$, в режиме «D» $n = 16$). Код величины D/n поступает на входы сумматора SM и устройство вычитания SUB , на вторые входы которых поступает код глубины дна H_b . На выходе устройства SUB формируется код начала строба приема $H_b - D/n$, на выходе сумматора SM — код конца строба приема $H_b + D/n$. Код $H_b - D/n$ подается на вход компаратора 2, код $H_b + D/n$ — на вход компаратора 3. На вторые входы компараторов поступает код текущей глубины H_i . В моменты равенства кода H_i кодам границ строба на выходах компараторов формируются соответствующие импульсы, поступающие на входы формирователя строба приема FCR . На вход FCR с формирователя $F4T_n$ подается также импульс, начало которого совпадает с $T_{з.п}$, а длительность в четыре раза больше длительности зондирующего импульса. В формирователе FCR осуществляется логическое преобразование поступающих импульсов, в результате чего на его выходе формируется импульс строба приема, поступающий далее на уже рассмотренный амплитудный селектор.

§ 13.4. Использование микропроцессоров и микроЭВМ в РПА

Цифровая техника интенсивно внедряется в РПА. В первых разработках нашли применение устройства с жесткой структурой на интегральных микросхемах с малой и средней степенью интеграции. Эффективность использования цифровой техники резко повысилась с появлением больших интегральных микросхем, в частности, полупроводниковой памяти большой емкости и микропроцессоров. Микропроцессоры позволили перейти к проектированию отдельных устройств РПА на основе программируемой логики. Основным преимуществом следует считать значительно большую гибкость устройства на микропроцессорах и микроЭВМ, которая заключается в возможности значительного изменения характеристик устройства как в процессе проектирования, так и при модернизации РПА путем изменения программной памяти. Конструкция и монтаж устройства при этом остаются неизменными. К преимуществам устройств с программируемой логикой относят также значительно меньшее время их разработки, более высокую надежность и меньшую стоимость проектирования и изготовления [5]. Однако следует отметить, что при необходимости обеспечения высокой скорости обработки информации (например, при первичной обработке эхосигналов) устройства с программируемой логикой часто уступают устройствам с жесткой структурой. Применение микропроцессорной техники не всегда оптимально для устройств, реализующих простые функциональные зависимости, особенно в том случае, если их конструкция может быть выполнена с использованием небольшого количества микросхем малой и средней степени интеграции.

Использование микропроцессорной техники осуществляется двумя путями: введение в состав РПА серийных микроЭВМ и создание оригинальных устройств на базе микропроцессорных комплектов. В первом случае разработчик РПА располагает возможностью использования развитого внутреннего и внешнего программного обеспечения микроЭВМ, что значительно сокращает сроки проектирования. Во втором случае обеспечивается достижение более оптимального использования всех возможностей применяемого микропроцессорного комплекта.

В настоящее время основными сферами применения микропроцессорной техники в РПА являются: а) вторичная обработка сигналов; б) вычисление координат и параметров движения целей; в) автоматическое слежение за целью; г) управление режимами работы РПА; д) контроль параметров РПА, работоспособности конструктивных модулей и линий связи между ними; е) обеспечение совместной работы с сопрягаемыми приборами и системами.

Такое разделение решаемых задач является условным, так как в большинстве случаев они являются взаимосвязанными.

Алгоритмы работы устройств вторичной обработки сигналов, реализуемые с использованием «жесткой» логики, достаточно под-

робно рассмотрены в предыдущих параграфах. Разработка аналогичных устройств с программируемой логикой чаще всего базируется на этих же или подобных им алгоритмах. Наличие общего источника поступающей информации и возможность использования результатов одних и тех же операций для получения различных выходных данных являются предпосылками совмещения всех функций вторичной обработки сигналов в одной микропроцессорной системе.

Производимые в РПА измерения времени распространения эхосигналов позволяют определить кратчайшую дистанцию до цели, т. е. наклонную дистанцию D_n . Для судоводителя более важно знание горизонтальной дальности до цели D_r и глубины ее залегания H . Существующие способы и устройства визуального отсчета этих величин на электромеханических (гидролокаторы «Прибой-101», «Сарган-Г») или электронных (гидролокатор Atlas Fishing Sonar 950) шкалах отнимают у оператора много времени и отличаются низкой точностью. В широкосекторной РПА с плоским веером ДН вследствие геометрических искажений, возникающих при проецировании этого веера на горизонтальную плоскость (поверхность моря), такие устройства могут быть использованы только для определения координат целей, находящихся на оси центральной ДН. Устранение указанных недостатков в современной РПА обеспечивается путем автоматического вычисления в программируемом процессоре величин D_r и H для целей, отмечаемых оператором на экране индикатора специальными визирами или маркерами. Отображение вычисленных значений может производиться на цифровых индикаторах (гидролокаторы «Таймень», «Угорь») или в виде формуляра цели непосредственно на экране электронного индикатора (гидролокаторы CS-30, CS-50, CS-70 фирмы «Fugipon»). В случае плоского веера ДН для вычислений могут использоваться следующие выражения (в предположении, что отсутствует рефракция звука по глубине)

$$H = D_n \sin \theta \cos \varphi \text{ и } D_r = \sqrt{D_n^2 - H^2}, \quad (13.8)$$

где θ — угол наклона центральной ДН; φ — угол между центральной и отмеченной маркером ДН. Для однолучевых гидролокаторов

$$H = D_n \sin \theta \text{ и } D_r = D_n \cos \theta. \quad (13.9)$$

Для представления оператору значений таких угловых координат, как пеленг или курсовой угол, на цель целесообразно использовать этот же процессор, так как в соответствующих алгоритмах используются те же значения углов θ и φ . Это же можно сказать и о вычислении величины $2v_c \cos \alpha / c$, представляющей собой согласно (7.24) доплеровскую поправку частоты излучения, и входящей в нее величины $\cos \alpha$, определяемой выражениями (7.25), (7.26) и (7.27).

В современных гидролокаторах аналогично ситуационным дис-

плеям (CD фирмы «Simrad», CS-10 фирмы «Furuno») производится вычисление и отображение на экране электронного индикатора модуля и направления вектора скорости цели (например, гидролокаторы SM600 фирмы «Simrad» и CS-30, CS-50, CS-70 фирмы «Furuno»). Для этой цели используются координаты целей, получаемые за несколько последовательных циклов зондирования.

Использование программируемых процессоров значительно упрощает организацию автоматического слежения за целью (АСЦ). Алгоритмы работы таких процессоров могут различаться в зависимости от назначения, структуры и технических характеристик РПА. Примером простого алгоритма АСЦ является способ, используемый в гидролокаторах CS-30 и CS-50 фирмы «Furuno». В момент включения этого режима фиксируется глубина залегания цели, с которой необходимо поддерживать постоянный эхоконтакт. Затем по мере продвижения судна с учетом его скорости производится периодическое вычисление предполагаемой горизонтальной дистанции до цели. Используя значение глубины и получаемых горизонтальных дистанций, процессор гидролокатора вычисляет новые углы наклона ДН, обеспечивающие удержание цели в растворе ДН, и выдает соответствующие команды для изменения угла наклона ДН.

В эхолоте FCV-121 фирмы «Furuno» используется режим автоматического слежения за морским дном. Процессор этого эхолота обеспечивает при изменении глубины моря удержание изображения морского дна в пределах нижней половины экрана ЭЛТ. Осуществляется это посредством смещения отметки донного эхосигнала к центру нижней половины экрана ЭЛТ в моменты приближения изображения морского дна к центру или нижнему краю экрана.

Частным случаем режима АСЦ является процесс стабилизации пространственного положения ДН при качке судна. Использование программируемого процессора для реализации необходимого в этом случае преобразователя координат (см. гл. 10) позволит резко сократить объем требуемой для этого аппаратной части. Этот же процессор целесообразно использовать для формирования сигналов управления исполнительными электромеханическими устройствами или электронными ДФУ, регулирующими положение ДН в пространстве.

Использование микропроцессорной техники позволяет сократить количество органов управления и упростить для оператора процедуры переключения режимов работы РПА. Так, например, в последних разработках фирмы «Simrad» большая часть органов управления заменена небольшим клавишным пультом (клавиатурой). В состав клавиатуры входят клавиши, пронумерованные цифрами от 0 до 9 и несколько вспомогательных клавиш. Одна из вспомогательных клавиш служит для одновременной установки совокупности некоторых средних параметров аппаратуры. Это же сочетание параметров устанавливается в момент включения аппаратуры. Нажимая клавиши в определенной последовательности

согласно инструкциям, высвечиваемым на специальном табло (эхолоты ЕТ100 и ЕК400) или на экране дисплея (гидролокаторы SM600 и SX200), оператор при необходимости может изменять параметры и режимы работы аппаратуры.

Наличие в составе РПА центрального процессора позволяет организовать оперативный контроль правильности функционирования отдельных конструктивных модулей (см. § 14.8), выполненных на цифровой элементной базе, и линий связи между ними. Возможность быстрой локализации в этом случае неисправного модуля значительно повышает эффективность использования РПА на промысле. Перспективным является использование микропроцессоров и микроЭВМ для контроля основных параметров РПА и работоспособности конструктивных модулей, выполненных на аналоговой элементной базе.

Тенденция к объединению различных устройств и аппаратуры рыбопромыслового судна в единую информационную систему [102, 108] выдвигает требование по обеспечению возможности обмена данными между отдельными компонентами этой системы. Такой обмен предполагает наличие у современной РПА специальных интерфейсов, функционирование которых обеспечивается процессором, входящим в состав РПА, или процессорами других компонентов системы. Независимо от наличия единой информационной системы процессоры многих рыбопоисковых приборов обеспечивают односторонний ввод данных от судового лага и гирокомпаса, а также обмен информацией с другой РПА.

В заключение отметим, что в зависимости от характеристик используемого микропроцессорного комплекта или микроЭВМ и от объема решаемых задач в состав рыбопоискового прибора могут входить один (например, эхолоты CVS-881В фирмы «Koden» и FCV-121 фирмы «Fugino») или несколько (например, гидролокатор SM600 фирмы «Simrad» и ситуационный дисплей CS-10 фирмы «Fugino») цифровых процессоров. В последнем случае один из процессоров является ведущим и координирует работу остальных процессоров.

Методы проектирования аппаратуры с использованием микропроцессорной техники и микроЭВМ и разработки программного обеспечения достаточно подробно рассмотрены в литературе [5, 8, 55].

Глава 14

УСТРОЙСТВА ОТОБРАЖЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ

§ 14.1. Электромеханические регистраторы

Промежуточным звеном в системе РПА—оператор являются устройства отображения информации. Основное назначение таких устройств — воспроизведение в удобном для восприятия оператором виде информации, получаемой РПА при эхолокации, и изме-

рение параметров и координат обнаруженных объектов лова. Помимо этого они могут обеспечивать индикацию различных вспомогательных данных (параметры движения судна, режимы работы отдельных устройств РПА, параметры аппаратуры в режиме контроля и др.) и сигнализацию о наличии отклонений каких-либо параметров РПА или внешней среды от нормы. В современной РПА используются следующие типы устройств отображения информации: электромеханические регистраторы, одноцветные и многоцветные электронные индикаторы, символьные (цифровые

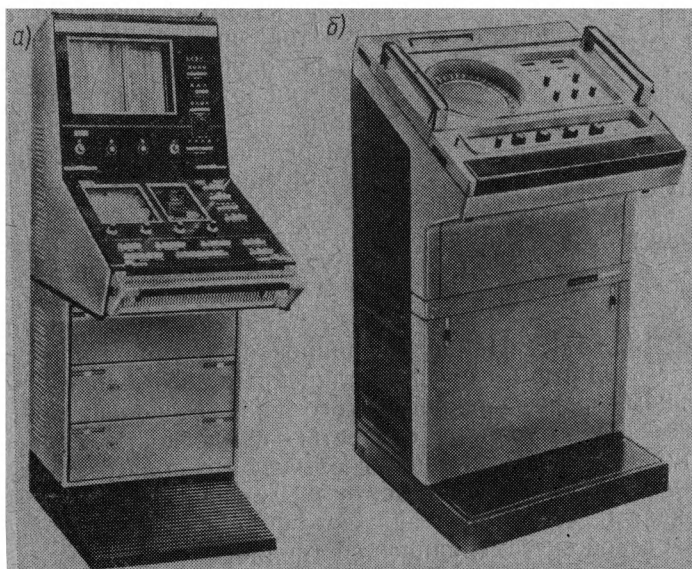


Рис. 14.1. Пульты управления и индикации гидролокатора «Таймень» (б) и эхолота «Сарган-ЭМ» (а).

и буквенно-цифровые) индикаторы, акустические (слуховые) индикаторы и различные сигнализаторы. Более высокие технические параметры современных электронных устройств позволяют говорить о неперспективности используемых до настоящего времени в РПА проблесковых индикаторов глубины, стрелочных и различных электромеханических указателей и индикаторов.

Устройства индикации и регистрации обычно объединяются с блоками управления РПА, образуя пульты управления и индикации. В качестве примера на рис. 14.1 показаны внешние виды пультов управления и индикации гидролокатора «Таймень» и эхолота «Сарган-ЭМ».

Значительный удельный вес электромеханических регистраторов (самописцев) среди устройств отображения информации РПА объясняется рядом присущих им положительных качеств [47]. Наиболее важным из них являются возможность документирования

ния гидроакустической информации и длительного хранения полученных эхограмм. В большинстве регистраторов РПА запись эхосигналов осуществляется на электротермической бумаге путем создания разности потенциалов между противоположными точками подложки и лицевой поверхности бумаги. Электрохимическая бумага в настоящее время используется редко в связи с необходимостью создания специальных условий для ее хранения. Значительное выделение при записи больших сигналов гаревой сажи, присущее электротермическим бумагам, достаточно эффективно устраняется посредством введения устройств автоматического ограничения тока прожига бумаги.

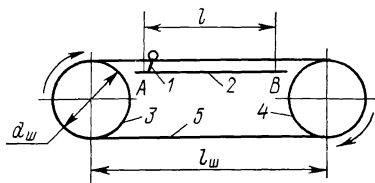


Рис. 14.2. Схема расположения элементов привода пера одноперьевого регистратора.

1 — перо; 2 — эхограммная бумага; 3, 4 — шкивы; 5 — бесконечный ремень.

Для осуществления временной развертки эхосигналов на бумаге регистратора может использоваться перемещение по прямолинейной или криволинейной траектории одного или нескольких пишущих электродов (перьев), последовательная коммутация большого числа (более 200) неподвижных перьев или вращение барабана с токопроводящей

спиралью [36, 47]. Наиболее широкое распространение получили регистраторы с прямолинейным (в зоне записи) перемещением пера, закрепленного на бесконечном ремне, вращающемся с постоянной скоростью в плоскости, перпендикулярной направлению перемещения бумаги. Воспользовавшись схематическим представлением траектории движения пера (рис. 14.2), можно показать, что период запуска зондирующих импульсов T_{Π} для одноперьевого системы записи составляет

$$T_{\Pi} = (2l_{\text{ш}} + \pi d_{\text{ш}}) t_{\text{зап}} / l, \quad (14.1)$$

где $l_{\text{ш}}$ — расстояние между осями шкивов; $d_{\text{ш}}$ — диаметр шкивов; $t_{\text{зап}}$ — время движения пера по рабочему участку записи; l — длина рабочего участка записи. Время $t_{\text{зап}}$ определяется выражением

$$t_{\text{зап}} = 2L/c, \quad (14.2)$$

где L — величина диапазона регистрации. Из рис. 14.2 и выражения (14.1) видно, что одноперьевым системам записи присущи большие потери времени на холостой пробег пера. Так как величина $T_{\Pi} \approx 3t_{\text{зап}}$ [36], потери времени могут быть значительно уменьшены при установке дополнительных перьев, располагаемых равномерно по длине ремня (например, трехперьевые системы записи в рыбопоисковых станциях «Прибой-101», «Сарган» «Лещ-Б»). Основные недостатки такой конструкции: сложность точной регулировки для каждого пера моментов запуска генератора посылок, неравномерный износ перьев, необходимость коммутации перьев при введении режима фазировки начала диапазона.

Для синхронизации момента начала излучения зондирующего импульса используются механические, электрические или магнитные устройства. В первом случае кулачок, закрепленный на ремне, в процессе движения периодически замыкает механическую контактную группу; во втором — перо при подходе к началу участка записи кратковременно замыкает специальную цепь запуска; в третьем — вместо кулачка на ремне устанавливается постоянный магнит, а механические контакты заменяются герметизированными магнитоуправляемыми контактами. Наибольшее распространение получил третий способ, обладающий большей стабильностью и надежностью. Для фазирования начала диапазона (смещения момента начала излучения относительно момента прохождения пером начала записи) используются дополнительные механические, электрические или магнитоуправляемые контакты.

Переключение диапазонов регистрации (изменение масштаба записи) для рассматриваемого типа регистратора может быть обеспечено при использовании многоступенчатого редуктора привода пера (самописцы комплекса «Прибой-101»), многоскоростного двигателя с коммутацией обмоток (гидролокатор «Сарган-Г», эхолот «Сарган-ЭМ») или с широтно-импульсной схемой управления скоростью вращения (эхолот «Пескарь», гидролокатор «Угорь»). Очевидно, что с увеличением числа диапазонов возрастает сложность этих устройств, в результате чего падает надежность и растет стоимость регистратора. Регистраторы с движущимся пером имеют также технические ограничения по максимальной скорости пера и соответственно по максимальному масштабу записи. Для них не достижима и реализация на одной линии записи участков с различными масштабами записи.

Использование в РПА полупроводниковых оперативных запоминающих устройств (ОЗУ), обеспечивающих запоминание параметров эхосигналов на любое требуемое время, позволяет устранить многие недостатки регистраторов с механическим приводом пера. В первую очередь, становится возможным использовать простой механический привод, обеспечивающий на всех рабочих диапазонах постоянную по величине скорость вращения пера. С этой целью запись информации в ОЗУ осуществляется со скоростью обратно пропорциональной величине диапазона (при постоянстве на любом из диапазонов количества дискретных выборок N_d амплитуды эхосигналов), а считывание информации из ОЗУ для подачи на перо производится с постоянной скоростью независимо от диапазона. Регистраторы с постоянной скоростью пера используются во многих рыбопоисковых приборах, в частности, в эхолотах NJA-307D, NJA-308D и NJA-320D фирмы «Japan Radio», в эхолоте Atlas Fischfinder 791DS фирмы «Krupp», в эхолоте и гидролокаторе рыбопоискового комплекса «Таймень». Для получения на малых диапазонах максимально достижимого количества эхоконтактов с объектом поиска скорость пера v_n необходимо выбирать возможно большей. С этой целью и для достижения кратности частот следования тактовых импульсов записи и счи-

тивания ОЗУ целесообразно пользоваться следующим соотношением:

$$v_{\pi} = lc/2L_{\min}, \quad (14.3)$$

где L_{\min} — величина минимального диапазона регистрации из ряда заданных, для которого еще возможна техническая реализация в аналогичной конструкции без использования ОЗУ. Частоты следования тактовых импульсов записи f_z и считывания $f_{сч}$ в этом случае определяются следующими выражениями:

$$f_z = N_{дс}/2L \text{ и } f_{сч} = N_{дс}/2L_{\min}. \quad (14.4)$$

Так как при нахождении пера на участке записи (линия АВ на рис. 14.2) ОЗУ должно работать в режиме считывания информации, формирование импульса запуска генератора послылок $T_{зп}$ необходимо производить после прохождения пером точки В. С этого момента (при отсутствии фазировки начала диапазона) ОЗУ переводится в режим записи поступающей информации. При величине диапазона большей L_{\min} время, необходимое для записи в ОЗУ всей информации, может превышать время движения пера от точки В до точки А. В этом случае включение режима считывания ОЗУ при подходе пера к точке А и формирование импульса $T_{з.п}$ после прохождения пером точки В блокируются. В результате этого ОЗУ будет переведено в режим считывания информации при вторичном подходе пера к точке А, и за каждые два оборота пера будет формироваться только один импульс $T_{з.п}$. При еще большей величине диапазона один импульс $T_{з.п}$ может приходиться на три, четыре и более оборотов пера. Считывание информации из ОЗУ при этом производится на последнем обороте пера.

Еще одним преимуществом регистраторов с ОЗУ является возможность введения практически плавной фазировки начала диапазона регистрации. Осуществляется это посредством задержки начала записи информации в ОЗУ на время $t_{\phi} = 2L_{\phi}/c$, где L_{ϕ} — значение дистанции до точки, соответствующей началу диапазона регистрации. Величина t_{ϕ} может формироваться независимо от значения установленного диапазона регистрации, а величины f_z и $f_{сч}$ не зависят в свою очередь от t_{ϕ} и определяются из выражения (14.4). В устройствах формирования задержки для обеспечения стабильности и точности получения величины t_{ϕ} используется принцип подсчета импульсов со стабильной частотой следования, сравнения получаемого кода с кодом, соответствующим установленной величине L_{ϕ} , и формирования импульса начала записи в момент равенства этих кодов. При увеличении величины t_{ϕ} наступает момент, когда перо приходит в точку А до окончания записи необходимого количества выборок $N_{д}$. Таким образом, аналогично рассмотренному выше случаю необходимо блокировать включение режима считывания ОЗУ в точке А и формирование импульса $T_{з.п}$ в точке В. В результате в зависимости от значения величины L_{ϕ} и L один цикл записи—считывания

информации (или один импульс $T_{з.п}$) может приходиться на один, два, три и более оборотов пера. В общем случае значение верхней границы диапазона регистрации $L_{в}$ и количество оборотов пера n , приходящихся на один цикл зондирования, связаны следующим соотношением:

$$L_{в} = L_{ф} + L = L_{\min} [n (2l_{ш} + \pi d_{ш}) - l] / l. \quad (14.5)$$

Необходимо отметить, что на больших диапазонах или при большой величине фазировки при формировании одного импульса $T_{з.п}$ за несколько оборотов пера доля, вносимая холостым пробегом пера в период следования импульсов запуска посылки, уменьшается с ростом числа n . В результате этого частота следования зондирующих импульсов приближается к ее значению в трехперьевой системе обычного регистратора.

Большим преимуществом рассмотренной конструкции регистратора является возможность введения диапазонов регистрации намного меньших достижимого в обычных регистраторах диапазона L_{\min} . Из выражений (14.4) видно, что это можно достигнуть путем соответствующего изменения частоты f_z при постоянстве величины $f_{сч}$. Например, для получения диапазона $L = 0,1 L_{\min}$ необходимо, чтобы $f_z = 10 f_{сч}$. Использование при приеме эхосигналов с различных участков дистанции разных частот f_z , а в процессе прохождения пером участка записи (в режиме считывания информации из ОЗУ) различных комбинаций величин N_d и $f_{сч}$ делает возможным разделение поля записи на участки с различными масштабами регистрации. Это позволяет производить одновременную регистрацию эхосигналов обзорного диапазона и придонного слоя или обзорного диапазона и расширенного участка этого диапазона и др. Например, в одном из режимов эхолота Atlas Fischfinder 791DS верхние 160 мм поля записи отводятся для регистрации эхосигналов обзорного диапазона с масштабом записи от 0,16 до 8 мм/м. Нижняя часть поля записи шириной 32 мм используется для регистрации эхосигналов придонного слоя с масштабом от 1,6 до 6,4 мм/м. В другом режиме нижняя часть поля записи расширяется до 64 мм и на ней производится регистрация эхосигналов с расширенного участка обзорного диапазона с масштабом от 0,64 до 3,2 мм/м. Масштаб регистрации эхосигналов обзорного диапазона при этом остается таким же, как и в первом режиме. В сочетании с плавной фазировкой основного диапазона комбинированная запись способствует более оптимальному использованию поля записи бумаги.

Использование полупроводниковой памяти позволяет ввести в регистраторы с движущимся пером режим панорамной записи эхосигналов многолучевого гидролокатора, применявшийся ранее только в регистраторах с гребенкой неподвижных перьев (гидролокаторы FSS-11A, FSS-12A, FSS-31C фирмы «Fugino» [42]). Такой режим дает возможность документировать информацию, получаемую при движении судна из широкого ограниченного по высоте слоя, параллельного поверхности моря. Горизонтальная

ширина этого слоя определяется наклонной дистанцией до него, а в глубине его залегания, кроме того, еще и углами наклона ДН. Принцип формирования панорамного слоя поясняется рис. 14.3, на котором также показаны примеры записи эхосигналов, принимаемых от объектов, расположенных в этом слое. Диаграммы направленности, образующие сектора обзора, для упрощения по-

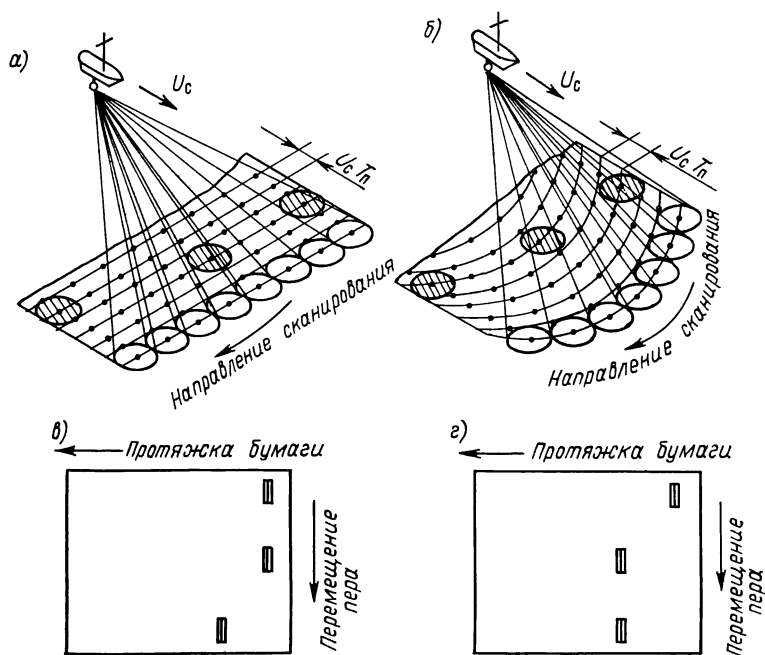


Рис. 14.3. Формирование панорамного слоя при перемещении ДН (вследствие движения судна) широкосекторных гидролокаторов с плоской (а) и цилиндрической (б) АС и соответствующее отображение информации на эхограммной бумаге (в, г).

казаны неперекрывающимися. Точки обозначают пересечения осей ДН с плоскостью панорамного слоя. Заштрихованные зоны соответствуют местоположению рыбных косяков.

В гидролокаторах с плоской антенной оси ДН, образующих сектор обзора (рис. 14.3, а), расположены в плоскости, угол наклона которой равен углу наклона антенны. Для формирования каждой строки панорамной записи в процессе сканирования ДН в режиме приема производится запоминание в ОЗУ амплитуд эхосигналов, принимаемых от объектов, находящихся в данный момент на линии пересечения этой плоскости с плоскостью панорамного слоя. При горизонтальной ориентации ДН обе плоскости совмещаются и линий пересечения становится бесконечно много.

В обоих случаях с целью получения максимальной ширины панорамного слоя необходимо записывать в ОЗУ информацию, получаемую с хорды сектора обзора, соединяющей точки максимальной дистанции крайних ДН. В режиме считывания ОЗУ эта информация записывается на бумаге регистратора в последовательности, обеспечивающей совпадение изображения регистрируемых объектов с их пространственным положением. Вследствие движения судна в каждом новом цикле излучения—приема хорда сектора обзора перемещается в пространстве на расстояние, равное $v_c T_{\text{п}}$. Так как бумага также перемещается в направлении, перпендикулярном перемещению пера, на эхограмме в итоге формируется изображение объектов панорамного слоя с таким пространственным положением, какое видел бы наблюдатель, находящийся высоко над ними (см. рис. 14.3, в). Рассмотренный способ формирования панорамной записи использован в регистраторе гидролокатора «Таймень».

В гидролокаторах кругового обзора с неподвижной цилиндрической антенной оси ДН представляют собой образующие конической поверхности, которая пересекается с плоскостью панорамного слоя по окружности. Для формирования панорамной записи используются эхосигналы той части окружности, которая пересекается с ДН, ориентированными в носовой сектор (см. рис. 14.3, б). При горизонтальной ориентации ДН также используются эхосигналы, принимаемые из носового сектора обзора. Наиболее простая техническая реализация достигается при последовательной записи в ОЗУ эхосигналов, поступающих в процессе поворота приемной ДН в пределах требуемой дуги окружности за один цикл сканирования. Примером такой реализации служит регистратор гидролокатора «Угорь». Однако, как видно из рис. 14.3, г, в этом случае вследствие прямолинейной траектории движения пера возникают геометрические искажения панорамы. Одним из путей устранения таких искажений является использование конструкции регистратора с пером, вращающимся по окружности, или гребенки неподвижных перьев, концы которых расположены по дуге окружности. В первом случае возрастают габариты регистратора, во втором — возникает необходимость использования электрохимической бумаги, требующей специальных условий хранения и эксплуатации. В обоих случаях при дополнительном введении в регистратор обычного режима записи эхосигналов с выбранного направления также возникают геометрические искажения. Более оптимальным, по-видимому, является усложнение электронной части одноперьевого регистратора с прямолинейным перемещением пера. Устранение геометрических искажений в этом случае может быть обеспечено путем подачи на перо в режиме считывания ОЗУ информации, соответствующей эхосигналам, пришедшим от объектов, расположенных в данный момент времени на хорде, соединяющей крайние лучи сектора обзора. С этой целью эхосигналы всех лучей, кроме крайних, должны запоминаться на время, необходимое для перемещения в простран-

стве хорды сектора обзора до проекции рассматриваемого луча на плоскость панорамного слоя. Очевидно, что максимальная задержка требуется для информации, поступающей по акустическому лучу, лежащему в одной вертикальной плоскости с вектором скорости судна. Так как величины задержек меняются при изменении угла наклона ДН, в состав такого регистратора должен входить процессор, обеспечивающий вычисление требуемых задержек и формирование на основе этих вычислений соответствующих адресов для записи информации в ОЗУ и ее считывания.

Во всех рассмотренных способах получения панорамной записи для достижения минимальных геометрических искажений панорамы судно не должно изменять курса, а центр сектора обзора должен совпадать с направлением движения судна. В этом случае условная горизонтальная линия, проходящая через центр эхограммной бумаги, будет соответствовать линии курса судна. При изменениях скорости судна возникают искажения горизонтального масштаба (для приведенной на рис. 14.3 ориентации эхограммной бумаги). Согласование скорости протяжки бумаги со скоростью движения судна позволяет сохранять постоянным масштаб изображения по курсу судна. Очевидно, что в этом случае привод протяжки бумаги должен быть независимым от привода протяжки пера.

Следует заметить, что применение отдельных приводов и в обычном регистраторе (без режима панорамной записи) позволяет повысить стабильность скорости вращения пера и уменьшить суммарное количество кинематических звеньев обоих приводов.

В современных регистраторах также претерпели значительные изменения и устройства отсчета дистанции. Традиционные накладные шкалы-линейки заменяются электронными устройствами, позволяющими записывать риски шкалы дистанций непосредственно на эхограммной бумаге. Принцип работы таких устройств основан на формировании высокостабильных по частоте следования серий коротких импульсов, количество которых в серии равно количеству рисков шкалы. Передний фронт первого импульса в каждой серии совмещается с моментом начала записи очередной строки эхограммы (нулевой отметкой). В результате при протяжке бумаги на эхограмме формируются штрихи, длина которых определяется количеством последовательных импульсных серий и скоростью протяжки бумаги. Для получения пробелов между шкалами формирование импульсных серий периодически прекращается. Запись рисков шкалы осуществляется одновременно с записью эхосигналов путем подачи на усилитель записи и соответственно на перо суммы импульсов шкалы и напряжений эхосигналов. Примером использования таких устройств служат регистраторы эхолотов EQ фирмы «Simrad», Atlas Fischfinder 791DS фирмы «Krupp», NJA-307D, NJA-308D, NJA-320D фирмы «Japan Radio», эхолота и гидролокатора комплекса «Таймень».

§ 14.2. Одноцветные электронные индикаторы

В современной РПА электронные индикаторы (ИЭ), в которых для отображения информации используются электронно-лучевые трубки (ЭЛТ), получили большее распространение, чем электро-механические регистраторы сигналов. Это связано со следующими преимуществами ИЭ:

- возможностью получения максимально достижимой частоты следования зондирующих импульсов вследствие малой величины холостого хода электронного луча;
- более широким, чем в регистраторах, динамическим диапазоном отображаемых эхосигналов;

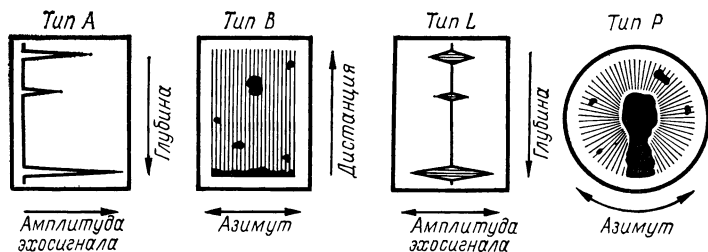


Рис. 14.4. Основные типы разверток, используемых в индикаторах РПА.

— совмещением на одном экране различных форм и способов отображения гидроакустической информации;

— совмещением с изображением эхосигналов специальных меток, линий визиров, символов, формуляров целей и дополнительной буквенно-цифровой информации;

— оперативной заменой части или всей отображаемой информации другой;

— возможностью оперативного изменения пространственной ориентации изображения.

Так как основными задачами РПА являются нахождение координат цели и оценка ее размеров, способ отображения информации на экранах ЭЛТ должен обеспечивать определение этих параметров. Для определения дистанции до цели при формировании изображения на экране ЭЛТ используется способ смещения отметки цели пропорционально времени запаздывания эхосигнала от цели. Информация о амплитуде эхосигнала в одноцветных электронных индикаторах отображается путем отклонения электронного луча перпендикулярно линии развертки дальности (развертки типа *A* и *L* на рис. 14.4) или путем модуляции луча по яркости (развертки типа *B* и *P* на рис. 14.4) [83]. Развертки типа *A* и *L* используются в РПА для отображения эхолотной информации, причем наибольшее распространение получили ИЭ с разверткой типа *L*. В таких индикаторах отклонение луча по оси амплитуд осуществляется путем подачи на отклоняющие

системы ЭЛТ недетектированных эхосигналов. Высокочастотное заполнение отметок эхосигналов в этом случае улучшает восприятие оператором получаемого изображения. В ИЭ с разверткой типа *A* одностороннее отклонение луча по оси амплитуд (отклоняющие напряжение или ток пропорциональны амплитуде отгибающей эхосигналов) позволяет увеличить в два раза динамический диапазон отображаемых сигналов (такой способ развертки используется, например, в электронном индикаторе СИ фирмы «Simrad»). Однако выходные каскады развертки таких ИЭ работают в более тяжелых режимах, что снижает их надежность.

Объем отображаемой информации в рассмотренных ИЭ может быть существенно увеличен при использовании двух параллельных временных разверток (например, индикаторы эхолотов «Сарган-Э», «Таймень»). В этом случае одна половина экрана используется для отображения информации обзорного диапазона, а другая половина — для воспроизведения в более крупном масштабе эхосигналов с интересующего оператора участка обзорного диапазона, в частности, из придонного слоя.

Развертки типа *B* и *P* позволяют определить одновременно три параметра цели, что широко используется в гидролокаторах для отображения помимо дальности и амплитуды эхосигналов от цели угловых координат целей (азимут или угол места). Индикаторы с разверткой типа *B* в современной РПА не находят практического применения вследствие несоответствия положения индицируемых отметок целей на экране пространственному положению целей. От этого недостатка свободны индикаторы кругового обзора (ИКО), в которых используется развертка типа *P* (в зарубежной РПА их называют индикаторами типа PPI — Plan Position Indicator). Развертка эхосигналов в этом случае осуществляется в полярной системе координат, в результате чего яркостные отметки целей располагаются на экране в точном соответствии с пространственным положением целей при наблюдении за ними с большой высоты (подобно изображению местности на географической карте). Аналогичный принцип формирования изображения используется и в индикаторах секторного обзора (ИСО). Изображения на экранах ИКО и ИСО обычно ориентируются относительно диаметральной плоскости судна, что обеспечивает удобство считывания по экрану индикатора курсового угла на цель. Возможно два способа технической реализации индикаторов с разверткой типа *P*. Первый способ использовался в однолучевых гидролокаторах (например, отечественных «Сарган-Г», «Прибой-101» и SS115 фирмы «Wesmar») с механическим разворотом антенны в горизонтальной плоскости. В ИЭ таких гидролокаторов временная развертка эхосигналов в каждом цикле зондирования независимо от углового положения антенны начинается в центре экрана и со скоростью, пропорциональной скорости звука, смещается по радиусу к краю экрана (при неподвижной антенне). При вращении антенны устройство отклонения электронного луча обеспечивает разворот линии развертки синхронно

с угловым перемещением антенны в горизонтальной плоскости. Для обеспечения одновременного наблюдения целей в возможно большем секторе обзора в таких индикаторах используется ЭЛТ с длительным послесвечением. В индикаторах с поворачивающейся линией развертки иногда используется дополнительный режим с амплитудной отметкой эхосигналов, позволяющий производить более детальную классификацию целей (например, в гидролокаторе «Сарган-Г»).

В гидролокаторах одновременного секторного или кругового обзора с электронным сканированием ДН используется второй способ получения отображения подводной обстановки на экране ИЭ в полярной системе координат. Развертка эхосигналов во времени при этом способе осуществляется по спирали, начало которой обычно располагается в центре экрана (гидролокаторы «Угорь» LSS-30, FSS-32B и др.). Устройство развертки электронного луча синхронизируется с устройством вращения приемных ДН (при цилиндрической антенне) или с коммутатором опроса каналов ДФУ в РПА со статическим веером ДН. В этом случае достигается равенство угловых скоростей вращения электронного луча и ДН в пространстве. Для обеспечения измерения дистанции скорость увеличения диаметра спирали устанавливается пропорциональной скорости распространения звука в воде.

В ИСО для формирования в требуемом секторе изображения эхосигналов используется подсветка соответствующих участков спирали (гидролокаторы FSS-12A, FSS-75B, LSS-68, KSS-88). С целью улучшения использования площади экрана ЭЛТ и увеличения диапазона индикации может вводиться дополнительный режим смещения центра развертки к краю экрана (гидролокатор FSS-75B). Аналогичный режим может применяться и в ИКО (гидролокатор FSS-32B). Свободная площадь экрана в ИСО может быть также использована для отображения дополнительной информации. Так, например, в гидролокаторе Atlas Fishing Sonar 950 в свободном от изображения горизонтального сектора обзора нижнем квадранте экрана высвечивается узкий сектор, отображающий угол наклона антенны. Внутри этого сектора, кроме того, индицируются отметки эхосигналов, принимаемых центральной ДН гидролокатора, с учетом вертикального смещения целей от оси ДН. Такое техническое решение однако может быть реализовано только при использовании элементов памяти.

Применение электронных ЗУ позволяет значительно улучшить технические характеристики и эргономические показатели электронных индикаторов РПА. В таких индикаторах поступающая из устройств обработки сигналов информация записывается предварительно в буферное ЗУ в темпе, определяемом скоростью распространения звука и (в индикаторах гидролокаторов) угловой скоростью вращения антенны или ДН. Одновременно с запоминанием (в режиме разделения времени) производится многократное за период зондирования в значительно более высоком темпе, чем при записи, считывание запомненной в текущем или преды-

дущем цикле зондирования информации (в зависимости от считываемого адреса и времени прошедшего с момента излучения посылки). Возможно также поочередное использование для записи и считывания двух идентичных блоков памяти, что упрощает организацию режимов работы памяти, но увеличивает стоимость аппаратуры. Считываемые из ЗУ цифровые коды преобразуются в аналоговое напряжение, которое подается на устройство отклонения луча ЭЛТ. Считывание информации обычно производится в том же порядке, что и запись. В этом случае отображение информации производится с использованием уже рассмотренных принципов формирования изображения, но с более высокими скоростями временной развертки (эхолот «Таймень», гидролокаторы «Таймень», Atlas Fishing Sonar 950). Более высокая скорость считывания информации из ЗУ, по сравнению с записью, позволяет устранить основной недостаток ИЭ, функционирующих в реальном масштабе времени, — мелькание изображения (периодическое изменение яркости элементов изображения от нуля до максимума). В результате значительно снижается утомляемость оператора и повышается надежность обнаружения цели. Это естественно достигается при достаточно высокой частоте регенерации изображения. Минимальная частота, выше которой мелькание изображения не воспринимается оператором, называется критической частотой мелькания. Значение этой частоты пропорционально логарифму яркости изображения и уменьшается при использовании люминофоров с длительным послесвечением. В зависимости от этих факторов величина критической частоты мелькания может лежать в пределах от 20 до 60 Гц [83, 105]. Обычно стремятся использовать минимально возможное значение частоты регенерации изображения, так как в этом случае упрощаются устройства отклонения луча ЭЛТ и снижаются требования к быстродействию ЗУ. При выборе ЭЛТ с люминофором, обладающим большим временем послесвечения, необходимо согласовать значение частоты регенерации изображения с временем послесвечения таким образом, чтобы к моменту появления нового изображения яркость старого падала более, чем на 20 %. В противном случае происходит значительное снижение четкости изображения [105].

Следует заметить, что в большинстве индикаторов РПА используются ЭЛТ с магнитным отклонением. Это объясняется тем, что в отличие от ЭЛТ с электрическим отклонением они обеспечивают получение высокой яркости изображения (более 150 кд/м²), необходимой при эксплуатации индикаторов РПА в условиях большой освещенности (ходовая рубка судна в дневное время суток). Кроме того, ЭЛТ такого типа при прочих равных условиях на 30 % короче ЭЛТ с электростатическим отклонением [105].

В последнее время в индикаторах РПА начали применяться растровые системы телевизионного типа. Так, например, в индикаторе эхолота Atlas Fischfinder 791DS растровая развертка используется для получения амплитудных отметок эхосигналов по-

добно развертке типа L. В этом индикаторе амплитудная отметка формируется при развертывании строки изображения, а порядковый номер строки определяет дистанцию, с которой был принят эхосигнал. Применение растровых систем позволяет использовать унифицированные технические решения и узлы, что сокращает сроки разработки РПА и снижает ее стоимость. Следует отметить, что из двух основных типов растровых систем — аналоговой и цифровой [105], практическое применение в современной РПА вследствие более высокого качества изображения и лучшей совместимости с цифровыми устройствами обработки сигналов находит последний тип. При проектировании индикаторов для аппаратуры комплексного отображения гидроакустической и навигационной информации могут быть использованы системы с произвольным отклонением луча (векторные системы), обеспечивающие более высокое качество изображения. Однако, по сравнению с растровыми системами, они обладают высокой стоимостью и более низкой надежностью [105].

Для обеспечения стабильности изображения и улучшения его качества при формировании развертывающих напряжений и сигналов управления током луча ЭЛТ используются методы и элементы цифровой техники с последующим преобразованием цифровых кодов в аналоговое напряжение (ЭЛТ является аналоговым устройством). Цифровые методы формирования изображения позволяют также упростить привязку к изображению эхосигналов изображения вспомогательных линий, меток и символов, предназначенных для измерения координат целей и повышения информативности и наглядности изображения. Совмещение изображений эхосигналов и дополнительной информации обычно осуществляется посредством неаддитивного смешивания исходных сигналов (отображается наиболее интенсивный сигнал, а не сумма сигналов).

Использование для съема дистанции и угловых координат целей специальных линий и меток, высвечиваемых непосредственно на экране ЭЛТ, позволяет отказаться от гравированных шкал и значительно повысить точность отсчета этих параметров. Более высокая точность обеспечивается вследствие отсутствия параллакса и одинакового воздействия дестабилизирующих факторов (при единой системе синхронизации всех функциональных модулей индикатора) на все элементы изображения, включая и специальные линии и метки. Значения координат цели при совмещении оператором маркировочных линий или меток с отметкой цели считываются в числовом виде с цифровых индикаторов, входящих в состав ИЭ, или непосредственно с экрана ЭЛТ. Преобразование информации о местоположении маркировочных линий и меток может производиться как аппаратными, так и программными средствами. Для грубой оценки дистанции на эране ЭЛТ могут высвечиваться метки дальности в виде линий (например, 11 линий на боковых полях индикатора эхолота Atlas Fischfinder 791DS) или колец (дуг) дальности (5 дуг в ИСО гидролока-

тора Atlas Fishing Sonar 950). В ИКО и ИСО по периметру экрана могут высвечиваться угловые метки (гидролокаторы «Таймень», Atlas Fishing Sonar 950).

В индикаторах комплексного отображения гидроакустической и навигационной информации возникает необходимость воспроизведения на экране большого количества символов и буквенно-цифровых данных. Минимальный объем аппаратуры в этом случае реализуется при использовании специального дисплейного процессора на основе микроЭВМ или микропроцессорных комплектов.

§ 14.3. Многоцветные электронные индикаторы

В современной РПА электронные индикаторы на одноцветных ЭЛТ постепенно уступают место индикаторам с многоцветными ЭЛТ. Это объясняется более широкими возможностями цветового кодирования информации. Хотя одноцветная ЭЛТ по сравнению с эхограммной бумагой имеет значительно больший динамический диапазон амплитуд отображаемых эхосигналов (до 15 градаций яркости [83]), в связи с физиологическими особенностями зрительного восприятия оператор может опознавать не более четырех одновременно представляемых градаций яркости. При цветовом же кодировании информации оператор может различать 7—10 одновременно представляемых на экране цветовых градаций [68, 105]. Однако возможно использование и большего количества цветовых оттенков. Так, например, в процессе работы с изображением, в формировании которого использовалось восемь цветовых градаций, после общей оценки всего изображения оператор может сосредоточить внимание на каком-либо отдельном фрагменте изображения, сформированном элементами двух-трех цветов. В этом случае более детальную информацию о структуре объекта, отображаемого этим фрагментом изображения, дает увеличение количества цветовых градаций, участвующих в его формировании. Это может быть достигнуто путем увеличения общего количества цветовых градаций всего изображения (обычно до 16). В качестве примера можно привести цветной индикатор CF100 фирмы «Simrad», используемый как приставка к эхолотам EQ, EK-S, ET100, EK400. В этом индикаторе кодирование амплитуды эхосигналов осуществляется по желанию оператора 8 или 16 цветовыми градациями. При использовании 16 цветовых градаций и шаге квантования амплитуды эхосигнала, равном 3 дБ, динамический диапазон отображаемых на этом индикаторе эхосигналов достигает 45 дБ.

В некоторых цветных индикаторах предусматривается, что относительно большое количество людей (8 %) не может использовать информацию, передаваемую различными цветами (цветовая слепота) [105]. Так, например, в цветном индикаторе гидролокатора Spectra-Scan 3000 фирмы «C-TECH» предусмотрен дополнительный режим кодирования информации 16 серыми то-

нами (в основном режиме используется восемь цветовых градаций) [113].

Цветовое кодирование амплитуды помимо увеличения динамического диапазона отображаемых сигналов улучшает также классификационные возможности индикатора. Цветовой контраст между слабыми и сильными сигналами позволяет легко отличать эхосигналы придонной рыбы от изображения морского дна, определять местоположение наиболее плотной части рыбного косяка, оценивать структуру морского дна и видовой состав рыбных косяков, выделять эхосигналы рыбных объектов на фоне поверхностной реверберации и эхосигналов от звукорассеивающих слоев [101]. Следует отметить, что использование цветового кодирования информации, по-видимому, допустимо только при частоте регенерации изображения большей критической частоты мельканий (см. § 14.2).

В настоящее время не существует определенных рекомендаций по порядку распределения цветовых градаций в зависимости от амплитуды эхосигналов. Анализ изделий зарубежных фирм показывает, что наибольшее распространение получило распределение, повторяющее порядок расположения цветов при спектральном разложении дневного света (цвета радуги). При этом обычно красным цветом кодируются эхосигналы с максимальной амплитудой, а синим — эхосигналы с самым маленьким или нулевым уровнем. При использовании большого количества цветовых градаций используются оттенки основных цветов, например, темно- и светло-голубой или темно- и светло-зеленый. При выборе порядка распределения цветовых градаций следует учитывать, что разрешающая способность цветового зрения для различных цветов неодинакова. Лучше всего глаз различает мелкие детали изображения, окрашенные в зеленый цвет. Размер красных элементов изображения, сравнимых по различимости с зелеными элементами, в 4—5 раз больше. Различимость синих элементов изображения в 10—12 раз хуже, чем зеленых [97].

С целью оптимизации восприятия информации конкретным оператором в индикаторах могут использоваться несколько вариантов распределения цветовых градаций (например, пять вариантов в эхолоте CVS-881B фирмы «Koden»). Для правильной идентификации амплитуды эхосигнала на боковом поле экрана индицируется полоса (по желанию оператора ее изображение может отключаться), составленная из цветных отрезков, расположенных в порядке, соответствующем принятому распределению цветовых градаций.

Для отображения информации, отличающейся по форме от изображения эхосигналов (например, буквенно-цифровой или линий измерительных шкал и визиров) обычно используется дополнительный белый цвет (индикаторы эхолотов CVS-881B, FCV-111, FCV-121 и гидролокаторов CS-30, CS-50, CS-70). Иногда для этой цели используется оттенок того цвета, который соответствует отсутствию эхосигналов, т. е. фону изображения (например,

светло-голубые линии шкалы глубин на синем фоне в индикаторе CF100), или оттенок любого другого цвета. Использование белого цвета для символьной и графической информации предпочтительно потому, что этот цвет наиболее благоприятен при длительном наблюдении [83] и обеспечивает более надежное считывание информации при удалении оператора от экрана индикатора. Последнее объясняется тем, что при использовании для этой цели других цветов мелкие элементы изображения символов и графической информации совместно с мелкими элементами изображения эхосигналов при наблюдении с большого расстояния могут по закону сложения цветов наблюдаться как пятна совершенно другого цвета.

Многоцветные электронные индикаторы гидролокаторов и эхолотов в связи с особенностями обзора водной среды этих двух типов РПА отличаются друг от друга видом получаемого изображения. Изображение на цветных индикаторах гидролокаторов аналогично по геометрическому виду изображению на индикаторах типа РРІ (см. § 14.2) одноцветных индикаторов. На цветных индикаторах эхолотов геометрическая форма представления гидроакустической информации подобна геометрической форме изображения, получаемой на эхограммах регистраторов (известны и одноцветные индикаторы с таким типом изображения, например, выпускаемые канадской фирмой «Vexilar»). Возможно и объединение на одном экране этих двух видов изображения. Так, например, в индикаторах гидролокаторов CS-30 и CS-50 фирмы «Fugipio» имеется режим, при котором $\frac{1}{5}$ часть экрана отводится для отображения информации, полученной за последние 64 цикла приема сопрягаемого эхолота. Различие в способах формирования рассмотренных двух видов изображения вызывает и разницу в их восприятии оператором. В индикаторах эхолотов при каждом новом цикле излучения—приема изменяется весьма малая часть всего изображения на экране. Медленное и одновременное смещение по экрану всех элементов изображения практически не вызывает утомления оператора. В индикаторах многолучевых гидролокаторов вследствие изменения при движении судна количества целей, их местоположения, интенсивности эхосигналов от них (в результате изменения дистанции и ракурса), а также характеристик и направления приема помех форма и цветовая гамма изображения на экране при каждом цикле излучения—приема могут изменяться по всей площади изображения. При непрерывном наблюдении это вызывает у оператора неприятные ощущения и служит причиной его быстрой утомляемости. В связи с этим при конструировании гидролокаторов с многоцветным индикатором необходимо уделять особое внимание возможностям резкого снижения количества отметок помех, отображаемых на экране индикатора, а также сглаживанию флюктуаций амплитуды эхосигналов (см. гл. 13). С этой целью в индикаторах гидролокаторов, по-видимому, не следует применять для кодирования амплитуд эхосигналов большое количество цветов. Так, напри-

мер, в индикаторах гидролокаторов SM600 и SX200 фирмы «Simrad» используется три цветовых градаций, по восемь цветовых градаций используется в гидролокаторах CS-30, CS-50, CS-70, CH-12 фирмы «Furuno», Spectra-Scan 3000 и CDS-40 Seamate фирмы «C-TECH».

В настоящее время для получения цветового изображения могут использоваться ЭЛТ типа «пенетрон» и масочные телевизионные кинескопы. ЭЛТ типа «пенетрон» позволяют получить высокую разрешающую способность, малочувствительны к магнитному полю Земли, но требуют применения специальных цепей коммутации высокого напряжения, обладающих малой надежностью, и не позволяют получить более четырех цветов изображения [80, 105]. Возможность получения практически любого количества цветов, значительно более низкая стоимость, высокая степень унификации при использовании в различных изделиях определили преобладающее использование в многоцветных индикаторах РПА стандартных цветных кинескопов.

При выборе цветной ЭЛТ для индикаторов РПА предпочтение, по-видимому, следует отдать кинескопам с щелевой маской. ЭЛТ такого типа обеспечивают значительно большую яркость изображения, чем ЭЛТ с мозаичным экраном и маской, имеющей триадное расположение отверстий. Кроме того, значительно сокращается количество операций по сведению лучей [105], что является большим преимуществом как при изготовлении РПА, так и при ее эксплуатации. При этом следует учитывать, что качественное сведение лучей обеспечивается только при стандартных частотах развертки, используемых в телевидении.

Существует два способа получения телевизионной развертки. В стандартных телевизионных приемниках используется чересстрочный способ формирования телевизионного раstra. Применение этого способа возможно и в индикаторах РПА. Однако в этом случае одиночные отметки эхосигналов, элементы символов или вспомогательные линии, параллельные направлению развертывания строк изображения, должны присутствовать в соседних строках обоих полукадров. В противном случае частота регенерации таких элементов изображения будет составлять 25 Гц и при умеренных яркостях возможно появление мелькания этих элементов [105]. Использование в индикаторах РПА построчной (прогрессивной) развертки позволяет избежать мелькания любых элементов изображения и, кроме того, значительно упрощает устройства формирования телевизионного раstra и синхронизацию работы других функциональных модулей индикатора. К недостатку построчной развертки следует отнести меньшее количество строк, участвующих в формировании изображения, в результате чего сильнее видна дискретность структуры изображения.

Многоцветные индикаторы РПА в зависимости от используемой элементной базы могут быть выполнены по различным структурным схемам. Но при любом варианте структурной схемы для

получения немелькающего изображения в состав индикатора должно входить устройство регенерации изображения, основным узлом которого является оперативное запоминающее устройство (ОЗУ). Информационная емкость V_m ОЗУ, предназначенного для хранения гидроакустической информации одного кадра изображения, определяется следующим выражением:

$$V_m = mnb, \quad (14.6)$$

где m — количество строк раstra, участвующих в формировании изображения эхосигналов; n — количество элементов изображения в одной строке; b — разрядность цифрового кода амплитуды эхосигнала.

Оценим требуемую емкость ОЗУ для типовых значений величин m , n и b . Так, для индикатора эхолота, в котором используется кодирование эхосигналов 16 цветовыми градациями, величина $b=4$. При $m=256$ и $n=512$ емкость $V_m=256 \cdot 512 \cdot 4 = 524\,288$ бит. При наличии режима запоминания на длительное время гидроакустической информации, соответствующей одному кадру изображения, информационная емкость ОЗУ должна быть увеличена в два раза. Приемлемые габариты ОЗУ, обеспечивающего хранение таких больших массивов информации, могут быть получены при использовании микросхем памяти с информационной емкостью не менее 16 кбит (для $V_m=524\,288$ бит необходимо 32 корпуса микросхем емкостью 16 кбит). Использование микросхем с меньшей информационной емкостью помимо увеличения габаритов ОЗУ вызывает значительный рост количества межпластных соединений, что резко снижает надежность работы индикатора. В настоящее время требуемой информационной емкостью обладают микросхемы ОЗУ, изготавливаемые по n -МОП технологии, например, динамические БИС ОЗУ с произвольной выборкой типа К565РУЗА.

Важным параметром микросхем памяти, влияющим на структуру устройства регенерации изображения, является длительность цикла обращения к ОЗУ. Для микросхем К565РУЗА это время составляет примерно 400 нс. Если принять количество обращений к ОЗУ за время формирования строки равным количеству элементов в строке изображения, то при $n=512$ и длительности прямого хода строчной развертки, равной 51,2 мкс (при частоте регенерации изображения 50 Гц и использовании построчной развертки с количеством строк, равным 512), время обращения к ОЗУ должно составлять не более 100 мс. Отсюда следует необходимость использования параллельно-последовательного способа считывания информации из ОЗУ. С этой целью из ОЗУ в последовательно соединенные регистры (с параллельными входами), обладающие высоким быстродействием, считывается за один цикл обращения информация, соответствующая нескольким последовательно расположенным элементам изображения (в данном случае не менее четырем). После фиксации в регистрах ин-

формация в требуемом темпе последовательно считывается с выхода последнего регистра для подачи на другие устройства индикатора. Число регистров должно быть удвоено для обеспечения попеременной записи и считывания информации.

Для формирования изображений буквенно-цифровых и графических символов, а также различных вспомогательных линий (меток шкалы, векторов, электронных визиров, линии курса судна и др.) в составе цветных индикаторов предусматриваются устройства регенерации вспомогательного изображения. Стабильность вспомогательного изображения обеспечивается путем поэлементной дискретизации всего телевизионного раstra и привязки местоположения символов и вспомогательных линий к задаваемым горизонтальным и вертикальным адресам этих элементов раstra. При формировании символов используются знакогенераторы, представляющие собой постоянные запоминающие устройства (ПЗУ), в которых в определенной последовательности записаны коды всех применяемых символов. Информационная емкость V_s ПЗУ знакогенератора должна быть не менее следующей величины:

$$V_s = k_s m_s n_s, \quad (14.7)$$

где k_s — количество используемых символов; m_s — количество горизонтальных элементов раstra, используемых при формировании символа; n_s — количество вертикальных элементов раstra, используемых при формировании символа. При отображении только цифровых символов обычно используется матрица 5×7 элементов, а при необходимости отображения букв и других специальных символов может использоваться матрица 7×9 элементов, обеспечивающая более надежную идентификацию символов [105]. Считываемые в требуемой последовательности из знакогенератора коды символов заносятся с соответствующей адресацией в буферное ЗУ, обеспечивающее регенерацию изображения символов. Воспроизведение символов производится при одновременном совпадении вертикального и горизонтального адресов каждого индуцируемого элемента символа с адресами, формируемыми счетчиками горизонтальной и вертикальной разверток. Аналогичный принцип используется и при формировании других элементов вспомогательного изображения.

Для наложения вспомогательного изображения на основное необходимо в моменты формирования элементов вспомогательного изображения блокировать подачу на преобразователь код—цвет индикатора кодов эхосигналов, хранящихся в ОЗУ устройства регенерации основного изображения, и обеспечить прохождение на этот преобразователь кода, соответствующего цвету формируемого в данный момент элемента вспомогательного изображения. В целях формирования признака вспомогательного изображения в кодах, предназначенных для подачи на преобразователь код—цвет, может использоваться дополнительный двоичный разряд.

В заключение отметим, что использование в многоцветных индикаторах РПА микропроцессорной техники (эхолоты CVS-881B, FCV-121, гидролокаторы CS-30, CS-50, CS-70, SX200) позволяет упростить структуру индикатора и повысить его надежность. Кроме того, в этом случае может быть достигнута высокая степень унификации индикаторов различных изделий и сокращены сроки модернизации РПА.

§ 14.4. Звуковые индикаторы

Практически все применяемые в РПА устройства отображения информации используют зрительный канал оператора. Однако звуковые индикаторы, являющиеся исторически первыми индикаторами гидроакустических устройств, по-видимому, еще долгое время будут использоваться в РПА. Объясняется это тем, что слуховой аппарат человека при использовании его в качестве обнаружителя и анализатора тональных сигналов приближается по своим возможностям к оптимальному детектору [96]. Кроме того, возможности обнаружения и анализа гидроакустических сигналов значительно повышаются при одновременном использовании зрительного и слухового каналов оператора. Немаловажное значение имеет и возможность введения при поиске рыбных скоплений дежурного режима РПА. В этом случае исчезает необходимость непрерывного нахождения оператора в непосредственной близости от пультов управления и индикации, снижается его утомляемость вследствие переключения внимания на другие объекты, появляется возможность параллельного выполнения работ с другой аппаратурой, находящейся в ходовой рубке.

В многолучевой РПА дежурный режим может обеспечиваться путем одновременного прослушивания эхосигналов, принимаемых из всего сектора обзора (гидролокатор Atlas Fishing Sonar 950), поочередного прослушивания каждого направления зондирования (гидролокаторы «Таймень», FSS-32B, FSS-75B, SX200) или прослушивания эхосигналов с какого-либо фиксированного направления (гидролокаторы «Угорь», SM600). Каждый из этих способов имеет свои недостатки, которые необходимо учитывать при проектировании конкретной РПА. В первом случае значительно снижаются помехозащищенность приема и, как следствие, дальность обнаружения; во втором — возрастает время обзора всего сектора наблюдения и появляются мертвые зоны; в третьем — становится высокой вероятность пропуска имеющей промысловое значение цели. В гидролокаторах, использующих в дежурном режиме второй способ обзора, для обеспечения возможности поддержания после обнаружения постоянного эхоконтакта с целью обычно предусматривается переключение в режим прослушивания с фиксированного направления.

Высокие характеристики слухового аппарата человека обеспечиваются его способностью одновременного анализа и сопоставления нескольких параметров звуковых сигналов. Вследствие фи-

физиологических и психологических особенностей слуха человека существуют различия между субъективными (воспринимаемыми оператором) и объективными (физическими) параметрами звуковых сигналов [107]. К субъективным параметрам слышимого звука относятся громкость, высота тона и тембр. Каждый субъективный параметр связан в большей или меньшей степени со следующими физическими параметрами: интенсивностью, частотой, формой спектра и длительностью звучания. При этом громкость наиболее сильно зависит от интенсивности звука, высота тона — от частоты, тембр — от спектра частот.

Звук, воспринимаемый ухом оператора при работе со звуковым индикатором РПА, представляет собой смесь эхосигналов, шумов и реверберационной помехи. Выделение полезного эхосигнала при прослушивании обеспечивается, если хотя бы один из субъективных параметров звука, соответствующего эхосигналу, отличается определенным образом от этого же параметра шума или реверберации. Так, например, при совпадении частоты и спектра эхосигнала и реверберации (случай эхолокации малоподвижных разреженных рыбных скоплений) обнаружение эхосигнала на слух возможно, если его громкость превышает на определенную величину громкость звучания реверберации. Эта величина тем меньше, чем уже критическая полоса слухового восприятия [107]. Так как критические полосы имеют минимальные значения при прослушивании в диапазоне частот от 100 до 1000 Гц [96], то, по-видимому, рабочая частота звукового индикатора должна быть близка к этим значениям.

В большинстве случаев звучание эхосигналов отличается от звучания реверберации и шума не только громкостью, но и высотой тона и тембром. Различие в высоте тона, возникающее вследствие проявления эффекта Доплера, является определяющим параметром при выделении слуховым трактом оператора полезных эхосигналов на фоне реверберационной помехи. При больших различиях ухо человека обеспечивает обнаружение эхосигналов даже при соотношении сигнал/помеха меньшем единицы [96]. Наибольшей чувствительностью к изменению высоты тона слуховой тракт человека обладает в диапазоне частот от 1000 до 4000 Гц (при средних уровнях громкости). Таким образом, для достижения компромисса между необходимостью использования минимальных критических полос слухового восприятия и достижением наибольшей чувствительности к изменению высоты тона среднюю частоту полосы пропускания звукового индикатора выбирают равной 1000 Гц или близкой к ней. В устройствах преобразования частоты принимаемых эхосигналов в центральную частоту звуковой индикации $f_{зв}$ обычно предусматривается возможность плавной или дискретной перестройки высоты тона. Это обеспечивает возможность подбора наиболее оптимального для конкретного оператора звучания принимаемых эхосигналов.

Порог обнаружения на слух тональных эхосигналов на фоне шумов и реверберации помимо других факторов зависит от дли-

тельности принимаемых импульсов. При длительностях принимаемых сигналов меньших 100 мс порог обнаружения тем выше, чем короче длительность. Для длительности 10 мс его величина возрастает на 20—25 дБ по сравнению со значением, получаемым для длительности 100 мс [96, 107]. Кроме того, при длительностях меньших 10 мс эхосигналы воспринимаются как неприятные для слуха резкие щелчки, утомляющие оператора. Из-за отмеченных недостатков применение звуковой индикации при длительностях излучаемых импульсов, меньших 10 мс нецелесообразно. В связи с этим практическое применение звуковые индикаторы находят только в гидролокаторах, имеющих для работы на максимальных дистанциях обнаружения большие длительности зондирующих импульсов.

При классификации обнаруженных целей на слух большое значение имеет тембр принимаемых сигналов, который зависит прежде всего от длительности излучаемых и принимаемых импульсов и от вида, размера и структуры зондируемых целей. Совокупность этих факторов определяет спектр принимаемых сигналов, т. е. количество гармоник и соотношение между их амплитудами и частотами. Наибольшее значение при классификации объектов по принимаемым на слух эхосигналам имеют гармоники, обусловленные флюктуациями огибающей эхосигналов. Для неискаженной передачи этих гармоник полоса пропускания канала звуковой индикации в режиме классификации должна быть значительно больше используемой при обнаружении величины $1/\tau$ (см. § 8.7) и может достигать величины $2f_{\text{зв}}$. Максимальная величина этой полосы на практике ограничивается необходимостью подавления комбинационных частот, значения которых зависят от используемого способа преобразования рабочей частоты РПА в частоту звуковой индикации. Для оптимизации характеристик тракта звуковой индикации в различных режимах работы обычно предусматривается возможность переключения полосы пропускания.

В качестве излучателей акустических колебаний в звуковых индикаторах используются встроенные в пульт управления и индикации (гидролокаторы «Прибой-101», «Сарган-Г», «Угорь», CS-30, CS-50, CS-70) или выносные (гидролокаторы «Таймень», SM600, SX200) громкоговорители. Второй вариант предпочтительней, так как обеспечивает лучшее качество звучания и позволяет проектантам судов согласовывать акустические характеристики громкоговорителя и помещения, в котором размещается РПА. В некоторых гидролокаторах (например, FSS-32B и FSS-75B) предусматриваются оба варианта размещения громкоговорителей. Для обеспечения работы оператора в условиях значительных внешних шумов (например, в штормовую погоду) или устранения помех работе других членов экипажа может быть предусмотрено использование дополнительных головных телефонов (гидролокаторы «Таймень», FSS-32B).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абчук В. А., Суздаль В. Г. Поиск объекта. М., Советское радио, 1977.
2. Андреева И. Б. Физические основы распространения звука в океане. Л., Гидрометеоиздат, 1975.
3. Антенны и устройства СВЧ. Расчет и проектирование антенных решеток и их излучающих элементов/Под ред. Д. И. Воскресенского. Учеб. пособие для вузов. М., Советское радио, 1972.
4. Артемов И. А., Кобяков Ю. С. Размеры рыбного косяка и его отметки на регистраторе рыбопоискового прибора.— Рыбное хозяйство, 1979, № 6, с. 37—39.
5. Балашов Е. П., Пузанков Д. В. Микропроцессоры и микропроцессорные системы. Учеб. пособие для вузов/Под ред. В. Б. Смолова. М., Радио и связь, 1981.
6. Бальян Р. Х., Сиверс М. А. Тиристорные генераторы и инверторы. Л., Энергоиздат, 1982.
7. Белов Л. А., Томский А. М. Искажения широкополосных сигналов в фазированных антенных решетках.— Зарубежная радиоэлектроника, 1979, № 10, с. 42—58.
8. Березенко А. И., Корягин Л. Н., Назарьян А. Р. Микропроцессорные комплекты повышенного быстродействия. М., Радио и связь, 1981.
9. Березин Л. В., Вейцель В. А. Теория и проектирование радиосистем. М., Советское радио, 1977.
10. Блохин Л. Н. Оптимальные системы стабилизации. Киев, Техника, 1982.
11. Боббер Р. Гидроакустические измерения. М., Мир, 1974.
12. Бреховских Л. М., Лысанов Ю. П. Теоретические основы акустики океана. Л., Гидрометеоиздат, 1982.
13. Вакман Д. Е. Сложные сигналы и принцип неопределенности в радиолокации. М., Советское радио, 1965.
14. Воронин В. А., Житковский Ю. Ю., Тарасов С. П. и др. Исследование параметрического гидролокатора в океанографических экспедициях.— Тезисы докладов II Всесоюзного съезда океанологов, вып. 4, ч. 2, Севастополь, 1982, с. 45—46.
15. Гаврилов А. М., Калягин Н. И., Котляров В. В. и др. К вопросу о буксируемой антенне параметрического гидролокатора.— В кн.: Прикладная акустика. Вып. X, Таганрог, 1983, с. 93—97.
16. Гольдштейн Г. Я., Иванов О. А. Оптимизация структуры рыбопоисковых гидролокаторов.— Судостроение, 1971, № 11, с. 41—43.
17. Гоноровский И. С. Радиотехнические цепи и сигналы. Изд. III, перераб. М., Советское радио, 1977.
18. Гречихин В. А., Гурский В. В. Гидролокатор для исследовательских целей.— В кн.: Прикладная акустика. Вып. X, Таганрог, 1983, с. 86—93.
19. Гринберг И. Э., Новиков Б. К., Тимошенко В. И. Параметрическая антенна в режиме самодетектирования.— Акустический журнал АН СССР, вып. 2, т. XXX, 1984, с. 199—203.
20. Гринберг И. Э., Новиков Б. К. Расчет характеристик параметрической антенны в режиме самодетектирования.— В кн.: Прикладная акустика, Вып. X, Таганрог, 1983, с. 16—22.
21. Гринберг И. Э., Рыбачек М. С., Соколов Р. А. и др. Применение параметрического излучения в рыбопоисковом комплексе «Сарган-К».— В кн.: Прикладная акустика. Вып. IX, Таганрог, 1983, с. 54—57.
22. Гурский В. В. Исследование излучений широкополосных сигналов параметрическим излучателем.— В кн.: Акустические методы исследования океана. Вып. 353, Л., Судостроение, 1981, с. 49—51.
23. Гуткин Л. С. Теория оптимальных методов приема при флюктуационных помехах. М., Советское радио, 1972.
24. Душаткин В. Н., Иванченко В. П., Рыбачек М. С. Низкочастотный гидроакустический параметрический излучатель.— В кн.: Прикладная акустика. Вып. X, Таганрог, 1983, с. 26—30.
25. Евтютов А. П., Митько В. Б. Примеры инженерных расчетов в гидроакустике. Л., Судостроение, 1981.
26. Жуков В. Б., Островский Д. Б. Параметрическая надежность гидроакустических антенн. Л., Судостроение, 1980.
27. Жуков В. Б. Расчет гидроакустических антенн по диаграмме направленности. Л., Судостроение, 1977.
28. Зарембо Л. К., Тимошенко В. И. Нелинейная акустика. М., Изд-во МГУ, 1984.
29. Иванова Н. И., Кобяков Ю. С. Современная рыбопоисковая аппаратура малотоннажных судов. ОИ. Сер. Промысловая радиоэлектронная аппаратура и подводная техника, вып. 1, М., ЦНИИТЭИРХ, 1978.

30. Иванов О. А., Сидько В. М., Тарасов С. П. и др./Серийный малогабаритный рыбопоисковый эхолот с параметрическим излучающим трактом.— В кн.: Прикладная акустика. Вып. X, Таганрог, 1983, с. 82—86.
31. Ильичев В. И., Сизов И. И. О классификации подводных объектов в промысловой гидроакустике.— Тезисы докладов I Дальневосточной акустической конференции, ч. I, Владивосток, 1974, с. 166—173.
32. Кабаков Л. С., Сидько В. М., Тарасов С. П. Параметрический гидролокатор для работы на мелководье.— В кн.: Акустические методы исследования океана. Вып. 353, Л., Судостроение, 1981, с. 5—12.
33. Кабаков Л. С., Сидько В. М., Тарасов С. П. и др./Применение параметрических антенн в промысловой гидроакустике.— В кн.: Прикладная акустика. Вып. X, Таганрог, 1983, с. 75—82.
34. Клей К., Медвин Г. Акустическая океанография. Пер. с англ./Под ред. Ю. Ю. Житковского. М., Мир, 1980.
35. Клюкин И. И., Клещев А. А. Судовая акустика. Л., Судостроение, 1982.
36. Кобяков Ю. С., Краснов В. Д. Регистрирующие устройства современных рыбопоисковых гидроакустических станций. ЭИ. Сер. Промысловая радиоэлектронная аппаратура и ее эксплуатация, вып. 6, М., ЦНИИТЭИРХ, 1977.
37. Кобяков Ю. С., Кудрявцев Н. Н. Влияние температуры воды на дальность обнаружения гидролокатором.— Рыбное хозяйство, 1980, № 9, с. 66—67.
38. Кобяков Ю. С., Кудрявцев Н. Н. Метод расчета дальности действия рыбопоисковой аппаратуры.— Рыбное хозяйство, 1978, № 6, с. 41—45.
39. Кобяков Ю. С., Сергеев С. Л., Иванова Н. И. Проблемы стабилизации луча гидроакустических антенн рыбопоисковых приборов. ОИ. Сер. Промысловая радиоэлектронная аппаратура и ее эксплуатация, вып. 5, М., ЦНИИТЭИРХ, 1977.
40. Колесников А. Е. Акустические измерения. Л., Судостроение, 1983.
41. Колчеданцев А. С. Гидроакустические станции. Л., Судостроение, 1982.
42. Кудрявцев В. И. Вопросы применения сканирующих гидролокаторов в рыбном хозяйстве. ОИ. Сер. Промысловая радиоэлектронная аппаратура и ее эксплуатация, вып. 2, М., ЦНИИТЭИРХ, 1975.
43. Кудрявцев В. И. Использование гидроакустики в рыбном хозяйстве. М., Пищевая промышленность, 1979.
44. Кудрявцев В. И. Некоторые вопросы создания и эксплуатации гидроакустической рыбопоисковой техники на промысловых судах. ОИ. Сер. Промысловая радиоэлектронная аппаратура и подводная техника, вып. 3, М., ЦНИИТЭИРХ, 1978.
45. Кудрявцев В. И. Новый тип рыбопоискового гидролокатора одновременного секторного обзора. ОИ. Сер. Промысловая радиоэлектронная аппаратура и ее эксплуатация, вып. 9, М., ЦНИИТЭИРХ, 1976.
46. Кудрявцев В. И. Повышение эффективности гидроакустической рыбопоисковой аппаратуры. ОИ. Сер. Промысловая радиоэлектронная аппаратура и ее эксплуатация, вып. 2, М., ЦНИИТЭИРХ, 1977.
47. Кудрявцев В. И. Промысловая гидроакустика и рыбоокация. М., Пищевая промышленность, 1978.
48. Крошьер Р. Е., Рабинер Л. Р. Интерполяция и децимация цифровых сигналов.— ТИИЭР, т. 69, № 3, 1981, с. 14—50.
49. Лейко Н. С., Маяцкий В. И. О статистических свойствах диаграмм направленности и выборе номинальных параметров дольчебышевских решеток/Под ред. А. А. Пистолькорса.— В кн.: Антенны. Вып. 12, М., Связь, 1971, с. 3—12.
50. Логинов К. В. Электронавигационные и рыбопоисковые приборы. М., Легкая и пищевая промышленность, 1983.
51. Мазепов В. И. Частотная оптимизация измерительной гидроакустической аппаратуры и метод оценки изменения дальности ее действия.— Тезисы докладов III Всесоюзной школы-семинара по статистической гидроакустике, М., 1971, с. 296—301.
52. Марычева С. В. Влияние рыбопоискового комплекса на эффективность работы промыслового судна. ОИ. Сер. Промысловая радиоэлектронная аппаратура и ее эксплуатация, вып. 1, М., ЦНИИТЭИРХ, 1976.
53. Матвиенко В. Н., Тарасюк Ю. Ф. Дальность действия гидроакустических средств. Л., Судостроение, 1976.
54. Мейлукс Р. Дж. Теория и техника фазированных антенных решеток.— ТИИЭР, т. 70, № 3, март 1982, с. 5—62.
55. Микро-ЭВМ «Электроника С5-21» и их применение/М. П. Гальперин, В. Я. Кузнецов, Ю. А. Масленников и др. Под ред. В. М. Пролейко. М., Советское радио, 1980.
56. Микроэлектроника и полупроводниковые приборы.— Сб. статей под ред. Ю. А. Кузнецова. М., Советское радио, вып. 3, 1978.
57. Митько В. Б., Евтюгов А. П., Гущин С. Е. Гидроакустические средства связи и наблюдения. Л., Судостроение, 1982.
58. Найт У. С., Придэм Р. Г., Кей С. М. Цифровая обработка сигналов в гидролокационных системах.— ТИИЭР, т. 69, № 11, 1981, с. 84—155.
59. Новиков Б. К., Руденко О. В., Тимошенко В. И. Исследования и разработка гидроакустических параметрических антенн и приборов.— В кн.: Нелинейная акустика/Под ред. В. А. Зверева и Л. А. Островского. Изд-во АН СССР, Горький, 1980, с. 31—44.
60. Новиков Б. К., Руденко О. В., Тимошенко В. И. Нелинейная гидроакустика. Л., Судостроение, 1981.
61. Новиков Б. К., Тимошенко В. И. Параметрические антенны в активной гидролокации. Л., Судостроение, 1986.
62. Ольшевский В. В. Статистические методы в гидролокации. Л., Судостроение, 1983.
63. Ольшевский В. В. Статистические свойства морской реверберации. М., Наука, 1966.
64. Орлов Л. В., Шабров А. А. Расчет и проектирование антенн гидроакустических рыбопоисковых приборов. М., Пищевая промышленность, 1974.

65. Патент США № 3846745 кл. GOIS 7/54, GOIS 3/80.
66. Патент ФРГ № 2535029 кл. GOIS 7/66.
67. Петров С. П. Электронный метод стабилизации направленности гидроакустических антенн с учетом качки.— Судостроение, 1982, № 11, с. 33—34.
68. Попов Т. П. Инженерная психология в радиолокации. М., Советское радио, 1971.
69. Потапов А. С., Тарасюк Ю. Ф. Дальность действия гидроакустических средств в океане.— Сб. Судостроение за рубежом, 1980, № 9 (165), с. 32—44.
70. Придэм Р. Г., Мучич Р. А. Цифровой интерполяционный метод формирования луча для низкочастотных и полосовых сигналов.— ТИИЭР, т. 67, № 6, 1979, с. 29—47.
71. Применение оптоэлектронных приборов. Пер. с англ./Под ред. Ю. Р. Носова, М., Радио и связь, 1981.
72. Применение цифровой обработки сигналов. Пер. с англ./Под ред. А. М. Рязанцева, М., Мир, 1980.
73. Рабинер Л. В., Гоулд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов. Пер. с англ./Под ред. Ю. Н. Александрова. М., Мир, 1978.
74. Раков А. И. Оптимизация основных характеристик и элементов промысловых судов. Л., Судостроение, 1978.
75. Раков В. И. Эффективность судовых радиоэлектронных систем. Л., Судостроение, 1974.
76. Саттон Д. Л. Подводная акустоскопия.— ТИИЭР, т. 67, № 4, 1979, с. 54—68.
77. Свердлин Г. М. Гидроакустические преобразования и антенны. Л., Судостроение, 1980.
78. Свердлин Г. М. Прикладная гидроакустика. Л., Судостроение, 1976.
79. Смаришев М. Д. Направленность гидроакустических антенн. Л., Судостроение, 1973.
80. Современные методы и устройства отображения информации/Под ред. М. И. Кривошеина и А. Я. Брейтбарта. М., Радио и связь, 1981.
81. Справочник по гидроакустике/Авт.: А. П. Евстинов, А. Е. Колесников, А. П. Ляликов и др. Л., Судостроение, 1982.
82. Справочник по радиолокации/Под ред. М. Скольника. Нью-Йорк, 1970. Пер. с англ. (в четырех томах) под общей ред. К. Н. Трофимова, т. 2. Радиолокационные антенные устройства. Под ред. П. И. Дудника. М., Советское радио, 1977.
83. Справочник по радиолокации/Под ред. М. Скольника, Нью-Йорк, 1970. Пер. с англ. (в четырех томах) под общей ред. К. Н. Трофимова, т. 3. Радиолокационные устройства и системы. Под ред. А. С. Виницкого. М., Советское радио, 1978.
84. Справочник по специальным функциям. Пер. с англ./Под ред. В. А. Диткина и Л. Н. Кармазиной. М., Наука, 1979.
85. Справочник по судовой акустике/Под общей ред. И. И. Клюкина и И. И. Боголепова. Л., Судостроение, 1978.
86. Старк Л. Теория фазированных антенных решеток СВЧ диапазона.— ТИИЭР, т. 62, № 12, 1974, с. 12—60.
87. Сташкевич А. П. Акустика моря. Л., Судостроение, 1966.
88. Степанян С. О., Папанян Г. Г. Методы и средства автоматизированного контроля и диагностики современных цифровых схем./Зарубежная радиоэлектроника, 1983, № 11, с. 29—44.
89. Судовые эхолоты/А. А. Хребтов и др. Л., Судостроение, 1982.
90. Тарасюк Ю. Ф. Программы расчета дальности действия гидроакустических средств.— Сб. Судостроение за рубежом, 1983, № 2 (190), с. 68—75.
91. Тимошенко В. И. Задачи по расчету основных характеристик параметрических акустических антенн.— В кн.: Сборник задач по курсу «Акустика», ч. II, Таганрог, 1978, с. 18—39.
92. Тимошенко В. И., Кудрявцев В. И. Возможности и перспективы применения параметрических гидроакустических рыбопоисковых приборов.— Рыбное хозяйство, 1981, № 3, с. 57—60.
93. Тимошенко В. И. Расчет и проектирование параметрических акустических преобразователей. Ч. 1 и 2 (учебное пособие). Таганрог, ТРТИ, 1978, 1980.
94. Тихонов В. И. Статистическая радиотехника. 2-е изд., перераб. и доп. М., Радио и связь, 1982.
95. Тюлин В. Н. Введение в теорию излучения и рассеяния звука. М., Наука, 1978.
96. Урик Роберт Дж. Основы гидроакустики. Пер. с англ./Под ред. Е. Л. Шендерова. Л., Судостроение, 1978.
97. Фельдман Л. Д. Телевизионный прием. 3-е изд., перераб. М., Энергия, 1978.
98. Физика океана. Т. 2. Гидродинамика океана./Под ред. А. С. Монина. М., Наука, 1978.
99. Хортон Дж. У. Основы гидролокации. Пер. с англ./Под ред. А. Г. Кухаренко. Л., Судпромгиз, 1961.
100. Хэмминг Р. В. Цифровые фильтры. Пер. с англ./Под ред. А. М. Трахтмана. М., Советское радио, 1980.
101. Шабалин В. Н., Бегельфер Е. М., Макарова С. Ф. Современная радиоэлектронная аппаратура, представленная на выставке «Инрыбпром-80». ОИ. Сер. Промысловая радиоэлектронная аппаратура и подводная техника, вып. 2, М., ЦНИИТЭИРХ, 1980.
102. Шабалин В. Н. Интегральная рыболовная автоматизированная система IFSS. ЭИ. Сер. Промысловая радиоэлектронная аппаратура и подводная техника, вып. 5, М., ЦНИИТЭИРХ, 1980.
103. Шабалин В. Н. Новые электронно-сканирующие рыбопоисковые гидролокаторы фирмы «Fugipno» (Япония) и особенности их использования на промысле. ЭИ. Сер. Промысловая радиоэлектронная аппаратура и подводная техника, вып. 12, М., ЦНИИТЭИРХ, 1979.
104. Шафер Р. В., Рабинер Л. Е. Методы цифровой обработки сигналов в задачах интерполяции.— ТИИЭР, т. 61, № 6, 1973, с. 5—18.
105. Шерр С. Электронные дисплеи. Пер. с англ./Под ред. Н. И. Богачкова. М., Мир, 1982.

106. Ширман Я. Д., Макжос В. Н. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. М., Радио и связь, 1981.
107. Пишкова Е. В. Физические основы промышленной гидроакустики. М., Пищевая промышленность, 1977.
108. Щепановский А. А. Радиоэлектроника на флоте рыбной промышленности.— Рыбное хозяйство, 1982, № 12, с. 42—45.
109. Юданов К. Н. Отражательная способность рыбных скоплений.— Рыбное хозяйство, 1972, № 5, с. 49—53.
110. Юданов К. И. Расшифровка эхограмм гидроакустических рыбопоисковых приборов. М., Пищевая промышленность, 1967.
111. Юдович Ю. Б. Промысловая разведка рыбы. М., Пищевая промышленность, 1974.
112. Яковлев Н. А., Каблов Г. П. Гидролокаторы ближнего действия. Л., Судостроение, 1983.
113. "Affordable" Omni sonar offer. World fishing, October 1982, p. 27.
114. Agarwal R. C., Cooley I. W. New Algorithms for digital convolution.— IEEE ASSP, vol. ASSP-25, No. 5, October 1977, p. 392—410.
115. Anderson V. C. Digital Array Phasing.— J. Acoust. Soc. Amer., vol. 32, 1960, p. 867—891.
116. Dolph C. L. A current distribution for broadside arrays which optimizes the relationship between beamwidth and sidelobe level. Proc. IRE, vol. 34, p. 335—345, 1946.
117. Echo Sounding and Sonar for Fishing FAO Fishing Manuals. Fishing News Books Ltd., Farnham Surrey, England, 1980.
118. Simrad Integrated Fishfinding System.— "Fishing News International", 1980, vol. 19, No. 8, p. 48.
119. Quazi Azizul H. Array beam response in the presence of amplitude and phase fluctuations.— J. Acoust. Soc. Amer., 1982, vol. 72, No. 1, p. 171—180.
120. Urick R. J. Principles of Underwater Sound, 2nd ed., McGraw-Hill, New York, 1975.
121. Winder A. A. Sonar system technology.— IEEE SU, vol. SU-22, No. 5, 1975.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Часть I	
ВЫБОР, ОБОСНОВАНИЕ И РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ РПА	
Глава 1. Развитие гидроакустической рыбопоисковой аппаратуры в СССР и за рубежом	5
§ 1.1. Краткие исторические сведения о внедрении гидроакустической аппаратуры на рыбном промысле	5
§ 1.2. Тенденции развития зарубежного рыболокационного приборостроения	7
§ 1.3. Развитие отечественной рыбопоисковой аппаратуры	13
Глава 2. Принципы построения и классификация гидроакустической рыбопоисковой аппаратуры	16
§ 2.1. Аппаратура, различающаяся по способу локации	16
§ 2.2. Классификация гидролокаторов по способу обзора	22
§ 2.3. Классификация аппаратуры по характеру решаемых задач	27
§ 2.4. Комплексирование аппаратуры	30
§ 2.5. Требования к аппаратуре судов различного класса	32
§ 2.6. Аппаратура вспомогательного назначения	35
§ 2.7. Принципы построения и классификация параметрических гидроакустических приборов	37
Глава 3. Эффективность использования и оптимизация РПА	50
§ 3.1. Критерии эффективности	50
§ 3.2. Зависимость выходного эффекта РПА от оптимальности ее структурной схемы	55
§ 3.3. Сравнительная оценка способов обзора по производительности поиска	57
§ 3.4. Оптимизация РПА	60
Глава 4. Гидроакустические уравнения	62
§ 4.1. Основное уравнение гидролокации	62
§ 4.2. Уравнения гидролокации	63
§ 4.3. Вероятностная оценка порогового отношения сигнал/помеха	65
Глава 5. Дальность действия	69
§ 5.1. Геометрическая дальность действия	69
§ 5.2. Влияние акустических характеристик морской среды на дальность обнаружения	71
§ 5.3. Метод расчета энергетической дальности действия РПА по номограммам	74
§ 5.4. Расчет дальности в условиях реверберационной помехи	80
Глава 6. Выбор рабочей частоты	86
§ 6.1. Оптимальная частота	86
§ 6.2. Аналитический расчет оптимальной частоты	87
Глава 7. Параметры аппаратуры в режиме излучения	92
§ 7.1. Характеристики направленности антенн	92
§ 7.2. Сканирование в режиме излучения	95
§ 7.3. Подавление дополнительных максимумов ДН при излучении	101
§ 7.4. Коэффициент осевой концентрации антенн РПА	105
§ 7.5. Излучаемая мощность и звуковое давление	106
§ 7.6. Длительность и частота следования излучаемых импульсов	108

§ 7.7. Компенсация влияния эффекта Доплера	110
§ 7.8. Основные характеристики излучения параметрических антенн	112
Глава 8. Параметры аппаратуры в режиме приема	129
§ 8.1. Методы и характеристики пеленгования в режиме приема	129
§ 8.2. Сканирование в режиме приема	133
§ 8.3. Подавление дополнительных максимумов в режиме приема	136
§ 8.4. Динамический диапазон принимаемых сигналов	136
§ 8.5. Коэффициент усиления приемного тракта	138
§ 8.6. Автоматическая регулировка усиления	139
§ 8.7. Полоса пропускания	143
Глава 9. Пространственная стабилизация характеристик направленно- сти антенн от качки судна	147
§ 9.1. Минимально допустимая ширина диаграмм направленности антенн без стабилизации их в пространстве при качке судна	147
§ 9.2. Особенности поиска рыбы эхолотом	148
§ 9.3. Обнаружение объекта поиска гидролокатором при качке судна	151

Часть II

ОСНОВНЫЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА РПА

Глава 10. Антенные устройства	154
§ 10.1. Основные тенденции развития антенной техники современной РПА	154
§ 10.2. Плоские антенны	157
§ 10.3. Цилиндрические антенны с двумерным сканированием	159
§ 10.4. Сферические антенны	163
§ 10.5. Размещение акустических систем на судне	164
§ 10.6. Устройства стабилизации	173
Глава 11. Тракт излучения	181
§ 11.1. Функциональный состав трактов излучения	181
§ 11.2. Усилители мощности	184
§ 11.3. Тракты излучения параметрических приборов	190
§ 11.4. Диаграммо-формирующие устройства	193
§ 11.5. Задающие генераторы	197
Глава 12. Первичная обработка эхосигналов	200
§ 12.1. Аналоговые системы пространственно-временной обработки эхосигналов	200
§ 12.2. Аналоговые устройства цифровых систем первичной обра- ботки и дискретизация сигналов	203
§ 12.3. Цифровые устройства временной обработки эхосигналов	206
§ 12.4. Цифровые устройства пространственной обработки эхосиг- налов	212
§ 12.5. Пример синтеза цифровых систем первичной обработки	217
Глава 13. Устройства вторичной обработки сигналов	222
§ 13.1. Цифровые устройства селекции эхосигналов на фоне им- пульсных помех	222
§ 13.2. Устройства выделения эхосигналов на фоне непрерывной помехи	228
§ 13.3. Устройства селекции донных эхосигналов	234
§ 13.4. Использование микропроцессоров и микроЭВМ в РПА	241
Глава 14. Устройства отображения информации	244
§ 14.1. Электромеханические регистраторы	244
§ 14.2. Одноцветные электронные индикаторы	253
§ 14.3. Многоцветные электронные индикаторы	258
§ 14.4. Звуковые индикаторы	264
Список литературы	267

