

ОЧЕРКИ ОБ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ И ПОМЕХОЗАЩИЩЕННОСТИ СВЧ-ПРИЕМНИКОВ РЛС

В.И. ПЛЕШИВЦЕВ

Т.И. ГРАДОВА

ОЧЕРКИ
ОБ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ
И ПОМЕХОЗАЩИЩЕННОСТИ
СВЧ-ПРИЕМНИКОВ РЛС



Публичное акционерное общество
«Научно-производственное объединение «Алмаз»
имени академика А.А. Расплетина»

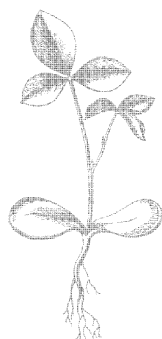


НПО АЛМАЗ

В.И. ПЛЕШИВЦЕВ
Т.И. ГРАДОВА

**ОЧЕРКИ ОБ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ
СОВМЕСТИМОСТИ И ПОМЕХОЗАЩИЩЕННОСТИ
СВЧ-ПРИЕМНИКОВ РЛС**

Москва
2018



УДК 621.396.96
ББК 32.95
П 38

П 38 Плешивцев В.И., Градова Т.И.

**Очерки об электромагнитной совместимости и помехозащищенности
СВЧ-приемников РЛС. – М.: ПАО «НПО «Алмаз», 2018. – 120 с.: ил.**

ISBN 978-5-9908060-5-4

Рассмотрены помехозащищенность и электромагнитная совместимость (ЭМС) многофункциональных приемников МРЛС наземного и бортового назначения, работающих в совместных территориальных группировках. Изложены специализированные характеристики и свойства как отдельных узлов, так и СВЧ-приемника в целом. Для взаимодействующих средств предложены оптимальные варианты сетки рабочих, гетеродинных, промежуточных и контрольных частот, специальные практические требования к характеристикам ЭМС/ЭМП приемников с учетом имеющихся помехоопасных узлов и методы измерений данных характеристик. Усовершенствованы элементы, обеспечивающие помехозащищенность СВЧ-приемников.

Материалы работы могут представлять интерес для радиоинженеров, работающих в данном направлении, а также использоваться в качестве учебного пособия для студентов и аспирантов профильных высших учебных заведений.

УДК 621.396.96

Рецензенты:

д-р техн. наук, проф. В.М. Алдошин,
канд. техн. наук М.Б. Митяшев,
канд. техн. наук С.В. Быковский

© В.И. Плешивцев
© Т.И. Градова
© ПАО «НПО «Алмаз», 2018

ISBN 978-5-9908060-5-4

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	5
Перечень сокращений	6
Введение	7
1. Источники помех и их воздействие на РЛС	9
2. Помехозащита и ЭМС современных РЛС	11
3. Воздействие внешних и внутренних помех на аналоговый приемник РЛС. Меры преодоления помеховых воздействий.:	14
4. Энергетические возмущения и способы их нейтрализации в СВЧ-приемниках	16
5. Особенности построения диапазонных СВЧ-приемников МРЛС с ФАР и АФАР	24
6. Усовершенствование защиты и ЭМС СВЧ-приемников РЛС	36
7. Технические несовершенства узлов СВЧ-приемника – ухудшение качества работы МРЛС	43
8. Оптимизация элементов диапазонных СВЧ-приемников МРЛС, улучшающая их ЭМС	53
9. Внедрение устойчивых к помехам узлов приемника диапазонных МРЛС	65
10. Помехоустойчивость взаимодействующих в локальной группировке средств. Выбор сетки рабочих, гетеродинных и промежуточных частот диапазонных МРЛС	72
11. Практические требования ЭМС/ЭМП приемников МРЛС с учетом имеющихся помехоопасных элементов	78
12. Критические факторы при разработке аппаратуры	82
13. Электромагнитные излучения большой мощности и другие воздействия на СВЧ-приемник	85
14. Методы измерений ЭМС/ЭМП СВЧ – приемных устройств МРЛС	90
15. Стандартизация требований по ЭМС/ЭМП СВЧ – приемных устройств МРЛС	94
16. Дополнительные общие схемотехнические и конструктивные требования по ЭМС/ЭМИ, предъявляемые к аппаратуре МРЛС	97

17. Оценка частотно-территориального размещения МРЛС в локальных группировках	102
18. Проведение оценочных испытаний аппаратуры передающих постов МРЛС	109
19. Некоторые формулы для работы с ЭМС/ЭМИ	114
20. Заключение	117
Литература	118

ПРЕДИСЛОВИЕ

Разработка и введение в эксплуатацию множества радиоэлектронных (РЭС) и радиотехнических средств (РТС) привели к возрастанию уровней электромагнитных полей, создаваемых ими на различных территориях и в воздушном пространстве. Электромагнитные поля являются помехами для других подобных устройств, ухудшают условия их функционирования, что снижает эффективность их использования.

Ключевым аспектом в данном контексте является эффективность работы военных радиотехнических устройств, обеспечивающих оборону определенных территориальных районов.

В монографии рассмотрен ряд особенностей СВЧ-приемников многоканальных МРЛС, работающих в локальных группировках, занимающих определенные территории земного и воздушного пространства. Изложены специальные характеристики и свойства отдельных узлов и приемников, работающих в составе ФАР или АФАР.

Показаны оптимальные варианты использования специализированных приемников, сеток сигнальных, гетеродинных, промежуточных и контрольных частот, подходящих для совместной работы средств защиты, входящих в группировку.

Приведены практические требования ЭМС/ЭМП приемников МРЛС с учетом имеющихся помехоопасных элементов, а также методы их измерений.

Публикуются стандарты и ГОСТ по ЭМС, действующие в России.

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ

АКП – автокомпенсатор помех
АП – антенный переключатель
АФАР – активная фазированная антенная решетка
АЧХ – амплитудно-частотная характеристика
БСМ – балансный смеситель
ВОЛС – волоконно-оптические линии связи
ГСН – головка самонаведения
ГШ – генератор шума
ДД – динамический диапазон
ИП – источник помех
КСВ – коэффициент стоячей волны
ЛБВ – лампа бегущей волны
ЛТГ – локальная территориальная группировка
ЛЧМ – линейная частотная модуляция
ЛЭП – линия электропередачи
МПЛ – микрополосковая линия
МРЛС – многофункциональная радиолокационная станция, работающая по принципу мгновенной равносигнальной зоны
МСВ – магнитостатические волны
МСЭ – Международный союз электросвязи
МШУ – малошумящий усилитель
ОГП – определение государственной принадлежности
ПЗ – помехозащита
ПЧ – промежуточная частота
РП – рецептор помеховых возмущений
ТОС – тракт обработки сигнала
ТРУ – транзисторный усилитель
ФАР – фазированная антенная решетка
ФПЗЧ – фазовое подавление зеркальной частоты
ЦЗКУ – циклотронно-защищенный комплексированный усилитель
ЦЗУ – циклотронное защитное устройство
ЭВП – электровакуумный прибор
ЭМВ – электромагнитные волны
ЭМИ – электромагнитный импульс
ЭМО – электромагнитная обстановка
ЭМП – электромагнитная помеха
ЭМС – электромагнитная совместимость
ЭСКУ – электростатический комплексированный усилитель
ЭСР – электростатический разряд
ЭСУ – электростатический усилитель

Самое главное – научить людей мыслить.

Б. Брехт

ВВЕДЕНИЕ

Электромагнитные процессы как формы существования материального мира дали человеку возможность создания многочисленных устройств, приборов и оборудования. При их работе возникают местные электромагнитные поля, взаимодействующие с окружающей средой. Радиотехнические средства, разработанные для совместного использования на замкнутых территориях или в заданных областях свободного пространства, испытывают влияние электромагнитных полей в виде паразитных помех от соседних устройств в различных частотных диапазонах. Данный факт обусловил необходимость нейтрализации указанных явлений, а также обеспечения работы в условиях их воздействия. Способность совместно работающих средств функционировать и выполнять различные задачи одновременно с влияющими на них устройствами без серьезных ограничений заданных тактико-технических характеристик определяется их электромагнитной совместимостью (ЭМС).

В настоящее время проблема ЭМС охватывает все виды радиотехнических, электронных, коммутационных и подобных средств, вырабатывающих электромагнитные и электрические поля.

Возрастание количества и качественное усложнение радиотехнических и радиоэлектронных средств затруднили работу проектировщиков при создании аппаратуры, пригодной для эксплуатации на заданных территориях. Особенно актуальной стала проблема ЭМС и помехозащищенности военной аппаратуры (в частности РЛС), выполняющей определенные задачи в локально-территориальных группировках. Здесь в каждом конкретном случае необходим системный подход, позволяющий учитывать весь спектр возможных ситуаций. ЭМС и помехозащищенность являются взаимосвязанными направлениями общей защиты взаимодействующих РЛС. Обеспечение ЭМС направлено на выявление всех факторов, влияющих на совместную работу изделий, определение их причин и разработку типовых рекомендаций, следование которым поможет избежать

появления недопустимых электромагнитных помех (ЭМП) и обеспечить взаимное функционирование устройств при воздействии ЭМП, не превышающих установленного требованиями уровня. Однако нередко возникают критические ситуации, при которых средства не могут совместно функционировать из-за внутренней электромагнитной несовместимости ввиду того, что разработчики не предусмотрели необходимых действий по их индивидуальной помехозащищенности. В подобных случаях требуется дополнительное проведение технических, а затем и организационных мероприятий. Технические мероприятия заключаются в устранении внутрисхемных помеховых возмущений или подвозбуждений, применении помехоустойчивых защитных или селекционных узлов, выборе сетки рабочих, гетеродинных, промежуточных и контрольных частот, улучшении экранирования внутренних и встроенных узлов и т.д. Организационные мероприятия подразумевают установку РЛС в подходящих условиях электромагнитной обстановки (ЭМО), частотно-территориальные размещения и др. С целью минимизации вероятных негативных последствий разработчики аппаратуры входных аналоговых СВЧ-приемников РЛС проводят исследования и предварительные расчеты возможного внутри- и внеаппаратурного влияния каждого радиотехнического узла.

Рассматриваются паразитные возмущения составных частей устройств и степень их излучения в окружающее пространство, влияние на устройства внешних излучений, различных промышленных помех, а также возможные электронно-силовые воздействия соседних средств на локальных территориях. Отдельному рассмотрению подлежат внешние природные влияния на радиотехническую аппаратуру.

Электромагнитная защита близко расположенных радиотехнических или электронных средств затруднена ограниченностью освоенного земного радиочастотного спектра электромагнитных волн и неравномерностью технического использования его участков. Например, в настоящее время теоретически освоенный диапазон спектра радиочастот – от 10 Гц до 400 ГГц, практически освоенный – до 100 ГГц.

Размещение на разработанной части радиочастотного спектра в определенных частотных участках устройств радиовещания, телевидения, телефонно-телеграфных линий, радионавигационного, бытового и другого оборудования, введение различных модификаций разрабатываемых и разработанных устройств, увеличение мощностей, широкополосности и многое другое затрудняет работу радиотехнической аппаратуры. Многие разработанные изделия используют большие полосы частот, что необходимо для выполнения поставленной задачи, следовательно, создают взаимные помехи в широких диапазонах частот, особенно на близко расположенных участках.

Проблемы преодоления взаимных помех радиотехнических средств заставляют искать новые аппаратурные решения, особенно для РЛС, работающих в группах и использующих общие частотные полосы.

Материалы монографии могут быть полезны проектировщикам аппаратуры при работе над улучшением характеристик ЭМС и помехозащитности новых военных РЛС, особенно диапазонных МРЛС.

1. ИСТОЧНИКИ ПОМЕХ И ИХ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА РЛС

Источниками радиолокационных помех являются все виды устройств, принцип функционирования которых связан с выработкой и излучением электромагнитной энергии. Это и устройства, специально не предназначенные для излучения электрической энергии (машины с искровым зажиганием, сварочные аппараты и другое оборудование промышленного или народно-хозяйственного потребления). В литературе, например [1], представлены различные классификации источников помех (естественных, искусственных, промышленных, бытовых и др.), которые распределены по классам, интенсивности, степени влияния и прочим характеристикам. Индустриальные помехи, составляющие один из наиболее распространенных классов, имеют значительную интенсивность и широкий спектр частотного распределения. На основании спектральных и временных характеристик помехи подразделяются на импульсные, флуктуационные, широкополосные, узкополосные, непрерывного, кратковременного, быстроменяющегося действия и т.п. Важно знать влияние того или иного типа помех на характеристики РЛС в случаях попадания помехи на нелинейные элементы входного приемника за счет возникновения более высоких частотных составляющих помехи. При нахождении большого количества подобных источников помех в непосредственной близости к РЛС возможно значительное ухудшение параметров работы станции за счет интермодуляционных или других комбинаций. Их влияние осуществляется как радиационным, так и кондуктивным путем (через соединительные кабели, проводники, шасси приборов и т.д.).

В случаях непосредственного влияния ЭМП на вход приемника воздействие происходит по зеркальным, побочным, комбинационным каналам или другими связанными путями. Задача разработчиков входных аналоговых приемников заключается в минимизации проявлений возмущающих помех.

Влияние помех, попадающих в приемное устройство радиолокатора через пространство, зависит от мощности источника помехи, пороговой

чувствительности входного устройства, длины волны помехи, параметров среды и ряда других факторов.

В зависимости от места расположения приемной антенны и ее высоты подъема относительно источника помех исследуемое пространство разделяется на ближние и дальние зоны взаимодействия. При этом излучение и прием радиопомех осуществляются антеннами радиоприемных устройств, радиопередатчика и корпусами различных устройств, имеющих недостаточное экранирование, например, соединительными кабелями, элементами монтажных схем, цепями электропитания, управления и другими элементами.

Характер воздействия СВЧ-помех на приемники РЛС различен в зависимости от структуры, спектрального состава и энергии помехи. При действии на РЛС мощной СВЧ-помехи возможны нарушения приема и даже необратимые ухудшения и отказ аппаратуры в первую очередь из-за изменения структуры входных полупроводниковых материалов – от частичного до полного их разрушения. Мощная помеха может существовать в виде одиночного воздействия или повторяющейся последовательности импульсов, а также гармонического или шумового непрерывного процесса.

В литературе опубликованы данные об энергии (в мкДж) одиночного импульса, приводящего к разрушению различных радиокомпонентов и электронных схем аппаратуры СВЧ-приемника:

- точечный контактный переход 0,01–10;
- низкопотенциальные интегральные схемы ≤ 10 ;
- малозумящие транзисторы приемников 10–100;
- мощные транзисторы передатчиков $\leq 1\,000$;
- электролитические конденсаторы питания 50–1 000;
- резисторы (0,25 Вт) $\sim 10^4$;
- реле 10^3 – 10^2 ;
- электростатический усилитель ЭСКУ $\geq 1\,000$.

При повторяющейся последовательности воздействия накапливающихся импульсов или квазинепрерывных колебаний выход из строя элементов электронных схем возможен при более низких значениях энергии помехи, которая может составлять единицы процентов от указанных выше величин.

Если действующая помеха не вызывает необратимых изменений в цепях рецептора, то может привести к функциональным отклонениям его параметров, то есть к перегрузке или насыщению активных входных элементов. Вследствие этого качественные показатели защищаемой аппаратуры ухудшаются даже в том случае, когда частота помехи значительно отличается от частоты настройки приемника.

Кроме того, во многих случаях помеха обладает так называемым последствием, заключающимся в том, что ее влияние становится заметным через некоторое время после прекращения воздействия, и требуется определенный период для восстановления нормального режима работы устройства. При воздействии помех небольшой интенсивности, соизмеримых по мощности с полезными сигналами, отмеченные явления отсутствуют, и принимаемые устройством мешающие электромагнитные колебания действуют в цепях наряду с полезным сигналом как аддитивные помехи. Поэтому чем лучше приемник оснащен помехозащитными средствами и функционально устойчивыми узлами, тем качественнее он может выполнять поставленные задачи. Указанная закономерность особенно актуальна для РЛС, находящихся в территориальных локальных группировках.

2. ПОМЕХОЗАЩИТА И ЭМС СОВРЕМЕННЫХ РЛС

Обеспечение электромагнитной совместимости РЭС, РЛС – одна из главных составляющих повышения помехозащищенности современной разрабатываемой аппаратуры. ЭМС обеспечивает возможность эффективного функционирования аппаратуры при наличии радиопомех различного вида, например, помех от совместно действующих в группировке устройств или от дуэльного случайного взаимодействия мощностей работающих РЛС, промышленных помех электроэнергетических установок, расположенных в зоне действия РЭС, помех от мощных электромагнитных излучений, помех, возникающих вследствие электромагнитных процессов в атмосфере (грозовых разрядов, разрядов статического электричества и т. д.), а также тепловых радиоизлучений земной поверхности, тропосферы, ионосферы или шумовых внеземных космических источников. Способы борьбы с перечисленными помехами различны. Современные радиоэлектронные средства исполняются с учетом необходимости обеспечения их нормального функционирования в условиях непрерывно действующих помех в заданном рабочем пространстве. Последствия увеличения воздействий подобных помех на приемные устройства РЛС:

- ухудшение чувствительности СВЧ-приемника вплоть до нарушения штатного функционирования устройства;
- ограничение линейного приема сигналов на фоне воздействующей помехи;
- снижение электрической прочности входных элементов приемника;
- выход из строя входных узлов приемника МРЛС.

Чем сильнее воздействие помеховой СВЧ-мощности на приемник, тем выше вероятность вхождения приемника и других устройств в перечисленные режимы. Появление нового радиолокационного средства на территории взаимодействия меняет электромагнитную обстановку и, соответственно, ЭМС устройств в зонах расположения действующих РЛС. Поэтому для успешного выделения полезного сигнала на фоне различных помех необходимы предотвращение перегрузки приемника помехами и определение совокупностей различных видов селекции по каждому виду сигналов. Более подробно перечисленные процессы рассматриваются ниже.

В последнее время задачи радиозащиты и ЭМС действующих в ограниченном территориальном районе РТС стали особенно актуальны. В данной главе изложены (без учета частных вопросов ЭМС в узлах и устройствах аппаратуры МРЛС) некоторые возможные методы уменьшения влияния совместно действующих радиотехнических средств в перегруженном спектре действующих частот на участках местности. В первую очередь это относится к многофункциональным комплексам РЛС, обеспечивающим защиту определенной охраняемой территории, одновременно осуществляющим защиту собственной аппаратуры от воздействия помех противника и своих РЛС, находящихся на данном участке местности. Подобные помехи могут достигать больших потенциальных значений, их необходимо подавить на входе или значительно ослабить их действие до приемлемых уровней. Одним из сложнейших воздействий на вход РЛС является мощный электромагнитный импульс.

Наряду с высокими параметрами ЭМС и радиозащиты радиотехнические средства, в том числе МРЛС, должны дополнительно выполнять определенные условия и правила работы, например:

- не выходить в эфир на основной рабочей частоте, если в данный момент она используется другим передатчиком РЛС в пределах прямой видимости, то есть их работа должна быть централизована;
- работа в перегруженном спектре частот возможна при изменении частоты повторений или других способов модуляции сигналов, а также в условиях незначительных помех, например, при снижении мощности передатчика до обеспечения работы РЭС в линейном режиме приема;
- при критической загруженности рабочего участка эфира наиболее действенным является мгновенный переход передатчика на запасные частоты. Однако этот метод может привести к новому обострению загрязнения электромагнитного поля на данном участке территории при работе нескольких РЭС;
- другие действия должны производиться в рабочее время в зависимости от обстановки.

Улучшить возможности помехозащиты возможно путем нестандартных действий, например:

- автоматической или ручной адаптации МРЛС за счет сужения полосы приема;
- управляемым заглублением чувствительности по каналу приема, загруженному помехами;
- изменением режимов работы, увеличивающим селекцию сигналов и верхнюю границу динамического диапазона многоканальных приемников;
- использованием компромиссных решений, таких как введение заранее рассчитанных величин защитных отношений с применением приемлемых значений отношения «сигнал/помеха» для различных режимов работы РЛС, импульсных, импульсно-фазовых и других соответствующих условий, облегчающих обработку сигналов в цифровом приемнике.

Возможны и другие корректировки работы РЛС. Перечисленному комплексу мер должна предшествовать разработка оптимальной сетки сигнальных, гетеродинных и промежуточных частот МРЛС.

Правильно выбранная сетка внутренних частот МРЛС с разработанными элементами самозащиты сводит к минимуму влияние помех на собственные РЛС, участвующие в работе, в реальном рельефе охраняемой территории. Для сохранения требуемых характеристик ЭМС необходима их своевременная диагностика в период эксплуатации. Однако практика показывает, что на этапе эксплуатации РЛС параметры ЭМС обычно не включаются в число диагностируемых.

Для уверенной подстройки режимов во время работы следует в свободные участки временной работы РЛС подавать на их входы с имитатора контрольные сигналы наиболее уязвимых частот, вырабатываемых соседними РЛС в данном диапазоне частот и конкретной местности.

Многообразие создаваемых электромагнитных полей от нескольких РЭС в локальных группировках требует перепроверки данных предложений.

Усовершенствование параметров помехозащиты и ЭМС наиболее актуально для современных МРЛС. Предложенный комплекс действий позволит избежать малоуспешных организационно-технических мер по выбору и размещению РТС в наиболее благоприятных рельефах местности и не перегружать совместно работающие МРЛС командами управления.

3. ВОЗДЕЙСТВИЕ ВНЕШНИХ И ВНУТРЕННИХ ПОМЕХ НА АНАЛОГОВЫЙ ПРИЕМНИК РЛС. МЕРЫ ПРЕОДОЛЕНИЯ ПОМЕХОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Мерой ощущения помехи для аналогового приемника РЛС, как правило, является рост превышения помехи над уровнем внутреннего белого шума приемника. Внутренний или белый шум приемника – это флуктуации из отдельных коротких импульсов ($\sim 10^{-12}$ с) со случайно изменяющимися амплитудой и фазой. Белый или СВЧ-шум имеет однородный спектр мощности в пределах почти бесконечной полосы частот. Его возникновение объясняется тепловым движением элементарных частиц в рабочем материале, а так как это движение постоянно, данный факт практически определяет предельную чувствительность приемника.

Повышение помехоустойчивости аналогового приемника в заданной полосе пропускания может быть достигнуто преимущественно путем увеличения амплитуды рабочего сигнала над белым шумом или выделения когерентных сигналов за счет их фильтрации или накопления. Воздействия на аналоговый приемник РЛС не связанных с техникой атмосферных помех, также представляющих собой непрерывные или импульсные процессы, создают в полосе пропускания приемника дополнительные флуктуационные шумы, сопоставимые с величиной его нормального белого шума. Источниками подобных помех могут быть колебания листьев деревьев и другие местные отражения. Указанные процессы ухудшают возможности увеличения соотношения «сигнал/шум».

Кроме того, существует класс низкочастотных и модуляционных шумов, например, доплеровский шум, возникающий вблизи несущей частоты принимаемого мощного сигнала за счет незначительных модуляционных процессов в СВЧ-активных усилителях и других активных элементах. При приеме сигналов в пределах линейной области СВЧ-приемника уровень таких низкочастотных шумов достаточно мал или сравним с белым СВЧ-шумом и не ухудшает чувствительности полезных сигналов с доплеровским сдвигом частоты. При появлении на входе усилителя СВЧ-приемника сильного сигнала, в том числе от собственного передатчика, выше границы ограничения подобный сигнал интенсивно модулируется составляющими низкочастотного шума, что расширяет его спектр, обеспечивая значительное превышение данным сигналом уровня СВЧ-шума. Этот процесс ухудшает чувствительность доплеровской РЛС, особенно при ее работе в импульсном режиме, так как в спектре сильных сигналов появляются составляющие, кратные частоте повторения. В полосу приемника в зависимости от ее ширины попадут десятки составляющих сигналов, модулированных шумами.

В настоящее время качественные СВЧ-усилители (например, электростатические циклотронно-защищенные), используемые в радиолокационных устройствах, работающие в условиях сильных энергетических сигналов, имеют спектральную плотность вырабатываемых шумов на частотах, отстоящих от несущей f_p проникающего сигнала на 1–150 кГц, примерно минус (120–145) дБ/Гц при уровнях ограничения его линейности 10^{-5} – 10^{-4} Вт. Однако нет нормализованных данных по образующимся низкочастотным доплеровским флуктуациям в других электровакуумных (ЭВП) и полупроводниковых приборах при воздействии на них внешних проникающих сигналов. Поэтому при разработке приемников РЛС данные характеристики получают экспериментально или в более простых системах, сравнением модуляционных шумов передатчика с шумами приемника в динамическом диапазоне его работы. Рассматриваемые характеристики не должны превышать доплеровских шумов, вырабатываемых передатчиком.

Все электромагнитные аддитивные СВЧ-помехи, как и внутренние шумы приемника, энергетически эквивалентны, и их можно оценить на входе РЛС с помощью единого параметра – «шумовой температуры» антенны T_a , позволяющего определить попавшую на вход согласованного приемника помеху, по следующей формуле:

$$P_r = k \cdot T_a \cdot \Delta f,$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана;

T_a – суммарная температура антенны от внешних принятых и внутренних шумов по шкале Кельвина.

Подобным образом определив «шумовую температуру» антенны T_a , можно произвести эквивалентную замену постоянно действующих внешних СВЧ-помех и внутренних шумов приемника тепловыми шумами P_r , в полосе приемника Δf согласованными с внутренним сопротивлением антенны, обладающей гипотетической температурой T_a . Температура антенны при различных видах помех в широком диапазоне частот определяется силой помехи, то есть помеха или снижает чувствительность приемника, или вводит его в ограничение вплоть до выхода приемника из строя.

Развитие этого тезиса дает возможность классифицировать «шумовую температуру» как изменяющуюся, приведенную ко входу антенны от внутренних и внешних шумов, и определять ее изменения для приемников РЛС при воздействии внешних факторов в виде дождя, снега, града, качания листвы деревьев и т. п.

В соответствии с перечисленными положениями на этапе разработки могут быть предусмотрены возможные или необходимые действия по

изменению режимов работы РЛС при различных воздействующих факторах, а также выбор укрытия или удобного изменения территориального расположения.

4. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ВОЗМУЩЕНИЯ И СПОСОБЫ ИХ НЕЙТРАЛИЗАЦИИ В СВЧ-ПРИЕМНИКАХ

Различные помеховые ситуации, влияющие на СВЧ – аналоговую часть современных высокочувствительных приемников, в том числе и РЛС, условно можно разделить на несколько видов:

- природные электромагнитные возмущения;
- постоянно действующие схемотехнические помехи и шумы;
- внутренние паразитные флуктуации и подвозбуждения;
- непреднамеренные индустриальные помехи;
- преднамеренные и случайные помехи совместно действующих или противодействующих средств.

Подробнее рассмотрим каждый вид помеховых ситуаций.

• Природные электромагнитные возмущения

Природные электромагнитные возмущения определяются:

- процессами, происходящими в атмосфере (грозовыми разрядами, магнитными бурями), сходами лавин, землетрясениями и подобными явлениями;
- тепловыми радиоизлучениями земной поверхности, тропосферы, ионосферы;
- внеземными радиоизлучениями космических источников.

Природные СВЧ-излучения, не связанные с технической деятельностью человека и разработанной им аппаратурой, по своим свойствам могут представлять собой непрерывный или импульсный электромагнитный энергетический процесс, который в пределах полосы избирательности приемника можно считать достаточно малым и близким к нормальному белому шуму приемника. В радиолокационном диапазоне частот такие помехи практически не влияют на работу РЛС, так как не превышают 300 °К (кроме случаев форс-мажора). В большинстве случаев при работе РЛС подобными помехами можно пренебречь.

• Постоянно действующие схемотехнические помехи и шумы

Внутренние шумы функциональных частей приемника и устройства в целом являются постоянно действующей схемотехнической помехой для него. Энергетические флуктуации, возникающие на различных частотах

вплоть до максимально воспринимаемых, и шумовое воздействие от отраженных местных предметов также можно считать постоянно действующими помехами приемнику.

Реальные границы динамического диапазона (ДД) приемника определяют заданные минимальную и максимальную возможности удовлетворительного использования приемников при наличии внутренних шумов и внешних помех. Однако и внутри реального динамического диапазона перечисленные помехи могут нарушать работу приемника как в амплитудном, так и в спектральном направлениях. Например, находящиеся вблизи РЛС местные предметы и отражения, шумовое влияние которых в зависимости от силы воздействия может вводить приемник в ограничение или засорять спектр принимаемого сигнала паразитными составляющими.

Сила, количество и виды многосигнальных помех, находящихся вне рабочей полосы приема, изменяют его динамический диапазон по рабочим сигналам. Поэтому разработка расширенного ДД и усиление П-образности амплитудно-частотной характеристики избирательности приемника необходимы для современного радиолокационного средства и определяются условиями его работы в соответствии с назначением.

• Внутренние паразитные флуктуации и подвозбуждения

Эмиссия радиочастотных помех в аппаратурных цепях и модулях РЛС чаще проявляется на частотах, близких к промежуточным, где конечные длины соединительных цепей с недостаточной экранировкой таковы, что в них возможны паразитные резонансы. Такие паразитные резонансные явления возникают в основном вследствие ошибок проектирования схемотехники.

В случае некачественного заземления корпусов блоков, модулей и при недостаточно экранированных соединителях возможна помехоэмиссия с функциональных цепей схем на другие цепи, что может привести к самовозбуждению отдельных фрагментов.

При накоплении статических зарядов в узлах, имеющих слабую электропроводимость линий заземления, возможны быстрые переходные процессы в местах максимальной концентрации зарядов, которые могут захватить полосу частот СВЧ-диапазона. В модулях, использующих печатные платы, источниками излучаемых помех являются токи, протекающие в схемах за счет вспомогательных цепей, например, синхронизации с местных генераторов и т. д. Часть энергии может излучаться непосредственно от печатных плат, смоделированных таким образом, что образуется местная малая антенна. При проектировании модулей с печатными платами необходимо тщательно прорабатывать места заземления и экранирования.

Основной задачей проектировщика СВЧ-аппаратуры является уменьшение возможной помехи, если она находится вблизи РЛС, или снижение до допустимого уровня связи внешнего источника помехи и рецептора. Не полностью экранированный компонент схемы может передавать энергию через магнитное, электрическое или электромагнитное поля в другую цепь схемы, с которой он имеет некоторую связь. Процесс может быть и обратным. Практически внутрисистемные и внешние связи между радиоустройствами могут быть подавлены или видоизменены введением экранирующих и диэлектрических материалов, а также изменением местоположения мешающего и воспринимающего элементов. Применение заземляющих шин должно быть осторожным, так как они могут усиливать мешающий сигнал за счет отражения от неоднородных участков. Связь схемных проводников может быть как емкостной, так и индуктивной, поскольку зависит от их взаимного расположения и длины связи. В работе [1] рассмотрены различные паразитные связи в схемах приемников: через проводные связи, магнитную или электрическую индукцию на согласованное входное сопротивление посредством образования излучающих элементов и др. Представлены различные модели связей, и выработаны предложения по компоновке, трассировке и заземлениям схемных печатных цепей, уменьшающие эти влияния.

• Непреднамеренные промышленные помехи

Непреднамеренной помехой можно считать неумышленное нежелательное воздействие электромагнитной энергии на приемное устройство внешними или соседними выполняющими свои задачи энергетическими устройствами, не препятствующими функционированию приемника специально. Данный вид помехи может оказывать энергетическое, частотное или спектральное влияние на приемник в рабочих или смежных полосах частот.

Источники промышленных энергетических помех можно разделить на три вида:

- технические средства, генерирующие высокочастотные колебания (промышленные, медицинские, телевизионные, научные установки и т. д.). Они излучают достаточно узкий спектр сигналов;
- не предназначенные для генерации высокочастотных колебаний устройства, в которых из-за резких изменений тока и напряжения в их цепях создаются помехи широкого спектра паразитных сигналов, например, от ЛЭП, электромашин, сварочных аппаратов, автомобильных или других систем зажигания, газоразрядных устройств и т. д.;
- соседние узлы устройств РЛС, влияющие на определенные рецепторы приемника.

Спектр многочисленных непреднамеренных помех достаточно широк (до 1 000 МГц).

Воздействие энергетических промышленных помех определяется мощностью источника помех, типом, размерами, ориентацией электрических цепей источника и приемника, а также конструктивными особенностями и наличием необходимого количества соединительных цепей объекта.

Влияние помех на рецепторы может осуществляться как посредством электромагнитных полей, так и кондуктивно. Непреднамеренные помехи, воздействующие на рецепторы электромагнитными полями, чаще всего принимаются антеннами РЛС, а также корпусами радиоустройств, соединительными проводниками или элементами цепей рецептора.

В [2] приведены полуэмпирические соотношения величин связей источников помех и рецепторов вследствие неполного экранирования устройств, которые могут быть использованы при проектировании устройств, особенно в случае их предполагаемого близкого расположения. Указанные соотношения представлены в табл. 1.

В табл. 1 приняты следующие обозначения:

$G_{\text{рп}}$ – коэффициент усиления антенны источника помех в направлении на радиоприемник;

$\lambda_{\text{ип}}$ – расстояние до источника помех;

$L_{\text{п}} (L_{\text{п ип}}, L_{\text{п рп}})$ – ослабление поля вследствие экранирования проводников;

$S_{\text{рп}}$ – площадь поверхности корпуса радиоприемника, обращенная в сторону ИП;

$\lambda_{\text{каб}}$ – длина кабеля;

$L_{\text{з}}, L_{\text{эт}} (L_{\text{з ип}}, L_{\text{з рп}}, L_{\text{эт ип}}, L_{\text{эт рп}})$ – эффективности экранирования блока и кабеля соответственно;

$$L_{\text{з}} = 10 \lg \frac{P_0}{P_{\text{изл}}};$$

$P_0, P_{\text{изл}}$ – значения мощности, проходящей через блок (или кабель) и излученной в пространство;

r – минимальное расстояние между ИП и РП;

λ, d – длина и диаметр проводников;

L^I – ослабление поля между проводниками (дБ), определяемое экспериментально в зависимости от частоты диапазона помех;

$L_{\text{п}}$ – ослабление поля вследствие экранирования проводов или скрученности пары, определяемое экспериментально в зависимости от частотного диапазона помех;

$w_{\text{ип}}, G_{\text{рп}}$ – расстояния между проводами, являющимися источниками помех или их рецепторами.

Таблица 1

Связи источников помех и рецепторов

Рецептор помех	Источник помех			
	Антенна	Корпус	Кабель соединительный при $\frac{I_{\text{каб}}}{\lambda_n} \geq 0,5$	Проводники плат
Антенна	Формула радиосвязи	$10 \lg \frac{G_{\text{рп}} \cdot S_{\text{рп}}}{4\pi r^2} - L_{3 \text{ мп}}$	$10 \lg \frac{G_{\text{рп}} \cdot \lambda^2 n}{16\pi^2} - L_{\text{эт мп}}$	$10 \lg \frac{I_{\text{рп}} \cdot W_{\text{мп}} \cdot G_{\text{рп}}}{4\pi r^2} - L_{\text{н мп}}$
Корпус	$10 \lg \frac{G_{\text{рп}} \cdot S_{\text{рп}}}{4\pi r^2} - L_{3 \text{ мп}}$	$10 \lg \frac{S_{\text{мп}} \cdot S_{\text{рп}}}{\lambda^2 r^2} - L_{3 \text{ мп}} - L_{3 \text{ рп}}$	$10 \lg \frac{S_{\text{рп}}}{4\pi^2} - L_{\text{эт мп}} - L_{\text{эт рп}}$	$10 \lg \frac{I_{\text{мп}} \cdot W_{\text{мп}} \cdot S_{\text{рп}}}{\lambda_n^2 r^2} - L_{3 \text{ рп}} - L_{\text{н мп}}$
Кабель соединительный	—	—	$10 \lg \frac{\lambda^2 n}{16r^2} - L_{\text{эт мп}} - L_{\text{эт рп}}$	$10 \lg \frac{I_{\text{мп}} \cdot W_{\text{мп}}}{4r^2} - L_{\text{эт рп}} - L_{\text{н мп}}$
Проводник плат	—	—	—	$L^I - 20 \lg \frac{50I_{\text{мп}}}{dr} - L_{\text{н мп}} - L_{\text{н рп}}$

Рассмотрение табл. 1 показывает, что наилучшие результаты ослабления помех в рецепторах дает их экранирование. При этом чем выше частота помехи, тем эффективнее экранирование вследствие малой глубины проникновения электромагнитного поля помехи на радиоприемник. Наличие в конструкциях радиоприемника отверстий, люков, зазоров и т. п. снижает эффективность экранирования. На высоких частотах, когда размеры экранов соизмеримы с длиной волны, могут возникать собственные объемные резонансы, возбуждаемые внешним полем помехи через отверстия и зазоры, что резко снижает качество экранирования. В процессе конструирования необходимо следить, чтобы электрические размеры отверстий, зазоров, люков не могли быть щелевыми антеннами для возможного прохождения помех от близко расположенных взаимодействующих средств.

Таким образом, требования к электрогерметичности устройств, особенно СВЧ-приемников РЛС, должны быть скорректированы в зависимости от реально размещаемых в непосредственной близости к радиолокационным станциям других постоянно действующих средств, потенциально являющихся источниками промышленных помех.

Другим типом непреднамеренных промышленных помех являются помехи, проникающие в радиоприемник за счет кондуктивных связей совместно расположенных устройств. Задачи разработчика – контроль проводниковых и фидерных связей с соседними блоками, недопущение кондуктивных, гальванических связей, вызванных дефектами изоляций проводников или наличием общих цепей заземления. В последнем случае протекание токов в одной из цепей создает напряжение на сопротивлении заземления R_z и соответствующий ток в цепи рецептора. Помехи могут наводиться в соединительных проводниках вносимым электромагнитным полем. При этом уровень связи зависит от соотношения волновых сопротивлений источника и нагрузки, а также длины их взаимодействия.

Снижение уровней излучаемых и кондуктивных промышленных помех и уменьшение восприимчивости РП к ним определены рядом стандартных требований к аппаратуре, в которых зафиксированы допустимые уровни помех и степень восприимчивости радиоприемников к подобным воздействиям.

• Преднамеренные или случайные помехи совместно действующих средств

Преднамеренная помеха – созданное противостоящей стороной помеховое воздействие на РЛС, ухудшающее результативность выполнения радиолокационным средством поставленных задач. По потенциальному воздействию к рассматриваемому виду помех можно отнести случайные совместные помеховые действия других РЛС, находящихся внутри

локальных территориальных группировок, выполняющих определенные задачи. Защита РЛС от преднамеренных помех или помех от совместно действующих средств достигается пространственной, поляризационной, частотной, временной, амплитудной, фазовой, структурной, функциональной или другой комбинированной селекцией сигналов РЛС на фоне действующих помеховых сигналов. Существует ряд радиолокационных методов очищения сигналов от помех. Однако мерами снижения внешних преднамеренных или совместных непреднамеренных помеховых действий других РЛС в аналоговой части СВЧ-приемника в основном являются фильтрация по входу и вспомогательным контрольным цепям, экранирование внутренних устройств, улучшение технологии монтажа и заземлений. Некоторые меры защиты представлены в [5], [6].

В целом решение проблемы защиты от преднамеренных, в том числе маскирующих, помех осложняется ограниченностью выбранного частотного спектра, неравномерностью его использования, техническим несовершенством антенных устройств, повышением чувствительности приемников, возрастающим уровнем и расширенным диапазоном излучений помеховых средств.

Воздействие изменяющейся по силе помехи в полосе прозрачности аналогового СВЧ-приемника можно разделить на три стадии:

- в линейной области динамического диапазона усиления возможны ухудшение чувствительности приемника и искажение сигналов, находящихся вблизи, за счет инерционности схемных цепей;
- область нелинейности приема характеризуется сильными искажениями и уменьшением амплитуды принимаемых сигналов вплоть до их исчезновения;
- воздействие энергетически сильного сигнала, превышающего электрическую прочность входных элементов, заканчивается заглушением и даже их выходом из строя.

Чтобы успешно функционировать в условиях большого количества электромагнитных помех, аналоговый СВЧ-приемник должен обладать электропрочностью, возможностью эффективного подавления помеховых сигналов, поступивших по зеркальным, интермодуляционным, побочным и другим каналам, а также попавших иными путями за счет ухудшения экранировки, некачественного заземления схемных цепей приема и управления, прохождения по гетеродинным распределителям и т. д.

Так как попадание сильных энергетических помех в СВЧ-приемник происходит преимущественно в результате дуэльных воздействий как противника через пространство, так и большого числа совместно работающих РЛС на заданной территории, при разработке приемника рекомендуется:

- обеспечить выполнение требований к характеристикам ЭМС в соответствии с ГОСТ или зарубежными стандартами (например, MIL STD-461E, MIL STD-469) в условиях определенных ограничительных задач;
- провести правильный выбор схемного построения приемника (рабочих, резервных частот, частот гетеродинов, значений номиналов промежуточных частот, селективных элементов и схем ФПЗЧ, обеспечивающих минимальное влияние помех в широком диапазоне частот);
- предусмотреть ориентировочную расстановку РЛС на местности (безопасные расстояния от других РЛС, обеспечивающие линейный режим их работы по основной диаграмме направленности антенны, боковым и задним лепесткам и т. д.);
- при фиксированных частотно-территориальных расположениях РЛС определить безопасный уровень влияния спектральных составляющих сигналов противостоящих РЛС, а также другие характерные требования.

Таблица 2

**Требования к различным элементам электросхем
многоканального СВЧ-приемника**

Элемент электросхемы многоканального СВЧ-приемника	Дополнительные требования, улучшающие пеленгационные характеристики РЛС и помехозащищенность
Входные тракты приема-передачи	Минимальный разброс групповой скорости ЭМВ между волноводными каналами СВЧ-приемника (обеспечение равенства электрических длин и импедансов каналов)
Входное защитное устройство	Подавление сигналов вне полосы рабочего приема (на зеркальных и других побочных частотах)
СВЧ МШУ	<ul style="list-style-type: none"> – АЧХ в расширенной полосе частот, включая f_{31}, $2f_{32}$ и др. – Уровень и распределение по частотам от f_p низкочастотных шумов в зависимости от мощности входного сигнала выше 10^{-5} Вт в диапазоне доплеровских шумов
Модуль первой промежуточной частоты	<ul style="list-style-type: none"> – Требования защиты от статического электричества. – Величины подавлений f_{31}, f_{32} и др. – Отсутствие местных паразитных возбуждений. – Требования экранировки, заземления и т. д.
Модуль второй промежуточной частоты	Аналогичные требования
Линии передачи сигналов с вращающимися соединениями	<ul style="list-style-type: none"> – Допустимая спектральная мощность наведения низкочастотных шумов от вращения соединений линий передачи. – Экранировка

Предлагаемый выше комплекс мер существенно повысит эффективность выполнения совместных задач многофункциональных РЛС, особенно в локальных группировках. В табл. 2 поэлементно предлагаются дополнительные требования к узлам диапазонных аналоговых СВЧ-приемников, улучшающие помехозащищенность, ЭМС и пеленгационные характеристики моноимпульсных РЛС.

Предложенные дополнительные требования следует учитывать в начале разработки, так как при ее завершении выбор возможных мер борьбы с помехами резко сокращается, что приводит к необходимости переработки аппаратуры.

5. ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ ДИАПАЗОННЫХ СВЧ-ПРИЕМНИКОВ МРЛС С ФАР И АФАР

Современные многофункциональные радиолокационные системы – это активные средства, использующие информацию обнаружения, опознавания, фиксации цели от радиосигналов, формируемых передатчиком и направляемых антенной в заданные точки пространства, с целью приема и обработки отраженных сигналов и получения требуемых данных для подавления воздействий противника или его уничтожения ракетным оружием. В соответствии с данными требованиями диапазонные МРЛС, работающие в составе военных группировок, должны функционировать в достаточно широком заданном частотном диапазоне совместного действия, быть оборудованными защитой входов от проникающих сигналов передатчика и ближайших отражений, осуществлять управление ДД усиления сигналов, подавление преднамеренных и непреднамеренных помех, поступающих по боковым лепесткам D_n антенны или по зеркальным и другим внеполосным каналам приема, допускать быструю электрическую перестройку по частоте. Эти и другие задачи выполняются многоканальным СВЧ-приемником, входящим в радиолокатор.

Условия работы таких СВЧ-приемников подразумевают соответствие ряду специфических требований к его функциональным характеристикам в целом, а также к его составным частям.

Предлагаемая функциональная схема антенного приемо-передающего поста МРЛС представлена на рис. 1.

В таких РЛС, использующих ФАР, в большинстве случаев мощность передатчика, поступившая с передающего рупора, частично отражается от элементов облучателя или выходного раскрыва фазированной решетки и при определенных положениях луча вблизи нормали к ее раскрыву фокусируется в приемный рупор иногда значительной величины. Мощности

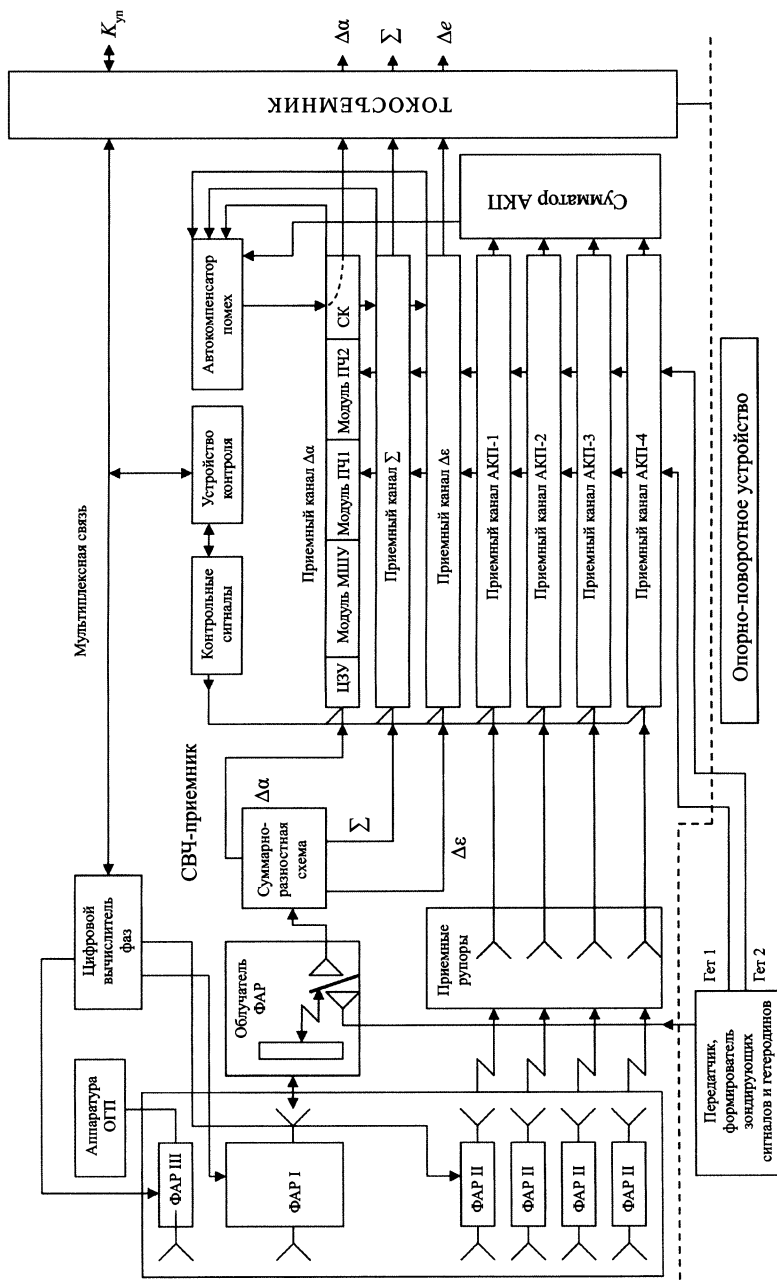


Рис. 1. Схема антенно-приемо-передающего поста моноимпульсной РЛС

в АФАР суммируются другим способом. Здесь с выхода в антенне МШУ квадрантной решетки (в количестве ≥ 10000 шт.) происходит передача единичных мощностей в приемный квадрупольный рупор, где они суммируются. Перечисленные обстоятельства, а также сильные отражения от местных предметов обуславливают повышенные требования к электропрочности СВЧ-приемника, то есть необходимость постановки специализированного защитного устройства на входе МШУ аналоговой части СВЧ-приемника.

В высокопотенциальных МРЛС в зависимости от режима работы могут использоваться разнотипные зондирующие сигналы с изменяющимися длительностями импульсов и частотами повторений, в том числе квазинепрерывный с изменяющейся фазой и пачечный режимы. Поэтому, помимо повышения требований к электропрочности СВЧ-приемника, должны обеспечиваться:

- малое время восстановления;
- высокая линейность его динамической характеристики.

Высокая линейность ДД необходима для сохранения уверенного приема радиолокационных сигналов в паузах излучаемых импульсных или пачечных кодируемых сигналов после сильных воздействий. При этом время восстановления чувствительности СВЧ-приемника должно быть предельно малым (менее 10–15 нс).

Для обеспечения высокой точности измерений координат целей и наводимых на них ракет необходима стабильность продолжительности и условий помех, значений крутизны пеленгационной характеристики моноимпульсной РЛС, что обуславливает жесткие требования к стабильности коэффициентов передачи и разности фаз сигналов в моноимпульсных каналах СВЧ-приемника.

Для работы в составе группировки должны быть обеспечены электромагнитная совместимость и помехозащита различных МРЛС, что требует значительного подавления сигналов зеркальных, побочных и других паразитных частот в СВЧ-приемнике. Кроме того, каждая РЛС должна иметь расширенный рабочий диапазон частот и возможность быстрого перехода на запасные частоты, чтобы уйти из помехового участка. Для обеспечения необходимых условий входная полоса частот СВЧ-приемника должна быть расширена. Здесь присутствует некоторое противоречие закономерности, заключающейся в том, что лучшим радиолокационным приемником считается тот, который обладает шириной полосы, согласованной со спектром принимаемого сигнала. Когда входная полоса пропускания более широкая, существует опасность одновременного приема нескольких паразитных сигналов, отстроенных друг от друга по частоте, которые усиливаются входным широкополосным усилителем. Более сильные

сигналы из этого круга могут вызвать перегрузку входного усилителя и, соответственно, уменьшить ДД приема вплоть до исчезновения линейных сигналов. Следующий за входным малошумящим СВЧ-усилителем первый смеситель сигналов, являясь нелинейным элементом, создает различные комбинации частот воздействующих сигналов. Динамический диапазон за счет предыдущего усиления сигналов будет снижаться. Кроме того, будут созданы сигналы на комбинационных частотах, часть из которых может дать частоты, кратные ПЧ. Перечисленные преобразования ухудшат общую чувствительность СВЧ-приемника. Решение подобной проблемы заключается в сверхбыстром изменении несущей частоты РЛС и расширении динамического диапазона усиления СВЧ-приемника. Опыт эксплуатации отечественных диапазонных РЛС сантиметрового диапазона показывает, что реальная мгновенная входная полоса СВЧ-приемника должна составлять 200–500 МГц при рабочем диапазоне РЛС от 1 000 МГц и выше.

Таким образом, при функциональном проектировании каналов СВЧ-приемника в начале разработки должны учитываться различные, иногда жесткие требования к характеристикам приемника и его узлов:

- входные СВЧ-тракты и пассивные узлы должны иметь минимальные потери, достаточную электрическую прочность. Каналы моноимпульсной РЛС, соответствующие наклонной и угломестной плоскостям пеленгации, должны иметь равную разность разностей электрических длин гетеродинных и сигнальных трактов;
- устройства защиты и динамического управления сигналами должны обладать широким диапазоном работы, высоким быстродействием, малыми потерями, обеспечивать необходимую развязку входов СВЧ-приемника от проникающих сигналов передатчика;
- входной МШУ должен обеспечивать:
 - необходимую электрическую прочность,
 - быстрый переход в режимы «прием – передача»,
 - низкие уровни тепловых и низкочастотных доплеровских шумов,
 - широкий ДД принимаемых сигналов;
- формирователи входной полосы должны обеспечивать избирательность в широком диапазоне заданных частот, стабильность импедансов;
- устройство подавления зеркальных и побочных каналов должно осуществлять требуемое ослабление сигналов зеркальных и побочных частот;
- преобразователи частоты должны обеспечивать малые комбинационные искажения и высокий коэффициент преобразования;
- предварительный усилитель ПЧ и согласующие устройства должны поддерживать достаточный уровень выходной мощности сигналов и требуемую линейность;

- устройство распределения гетеродинных сигналов должно обеспечивать достаточную экранировку, согласование трактов и малую погрешность при делении сигналов по потребителям;
- узлы управления режимами работы должны создавать условия для минимальной инерционности цепей и отсутствия паразитного влияния на рабочие цепи приемника;
- автокомпенсаторы помех должны поддерживать заданный уровень подавления помех противника по боковым лепесткам диаграммы направленности антенны и минимальное время для их компенсации;
- аппаратура контроля должна обеспечивать функциональный автоматизированный контроль приемника в составе антенного поста, а также регламентный контроль его основных параметров;
- источники питания должны быть стабилизированы и иметь малый уровень пульсации.

Из перечисленного набора характеристик в первую очередь должны быть учтены ключевые требования.

Еще в 90-х годах XX века американские ученые Д. Бартон и К. Хилл [4] считали, что основополагающими тенденциями развития радиолокационной техники должны быть:

- повышение помехозащищенности;
- устранение мешающих сигналов, то есть работа с чистыми спектрами рабочих сигналов;
- реализация устройств в новых диапазонах волн.

К базовым направлениям развития радиолокационной техники также можно отнести обеспечение энергетической самозащиты и сверхбыстрого восстановления.

Первые устройства самозащиты в виде громоздких разрядных узлов блокировки магнетрона передатчика и защиты приемников были недостаточно эффективны. В последние десятилетия разработаны входные устройства, обеспечивающие высокую электрическую защиту входа СВЧ-приемника с малым коэффициентом шума, при этом соответствующие ряду других сопутствующих требований. Такие устройства, рассчитанные на высокую коммутируемую падающую мощность (киловатты импульсной, сотни ватт средней), должны одновременно удовлетворять требованиям по быстродействию (τ_6 , нс), полосе пропускания (Δf , МГц), развязке ($P_{\text{разв}}$, дБ) и минимуму вносимых потерь ($P_{\text{вн}}$, дБ). Совмещение всех требований приводило к значительному усложнению схем защитных устройств (ЗУ) и увеличению вносимых потерь. К таким схемам можно отнести разработки ЗУ на основе многодиодной резонансной решетки в волноводном сечении, равномерно распределяющей электрическую нагрузку между коммутируемыми диодами, что может заметно повысить ее электри-

ческую прочность [6]. Так, например, разработанное защитное устройство на четырех коммутируемых в поперечной плоскости волновода диодах в сантиметровом диапазоне частот имело предельный уровень падающей на ЗУ непрерывной воздействующей мощности 140 Вт, соответственно, импульсной 1 кВт при $\tau_{\text{н}} \leq 100$ мкс и начальных потерях $\sim 0,8$ дБ [8].

Другим решением, примером которого может служить разработка высокопрочных ЗУ фирмой EEV Ltd «Microwave products», являются приборы комбинированного типа с ограничительной секцией, игнитронным и плазменным разрядниками. Достигнутые результаты: при полосе пропускания $\Delta f_{\text{пр}} = 800$ МГц действующая импульсная мощность составила 5 кВт ($\tau_{\text{н}} = 100$ мкс, $Q = 30$) при средней мощности 250 Вт и времени восстановления $\tau_{\text{в}} \leq 0,2$ мкс при вносимых потерях до 0,6 дБ. Схема СВЧ – приемного канала, включающего данное защитное устройство, фильтр СВЧ, малошумящий усилитель и последующие каскады, представлена на рис. 2. В рекламных материалах сообщается, что в зависимости от пропускаемой мощности требуется предварительная установка вакуумных и плазменных каскадов ЗУ. Преимущество подобной схемы заключается в том, что процесс защиты такого ЗУ ступенчатый. В процессе работы взаимовлияющих РЛС в сильном меняющемся энергетическом поле и при нарастании величины входной мощности до 800 Вт и выше последовательно срабатывают ограничитель или разрядные секции. Таким образом, в зависимости от ЭМО в территориальных группах РЛС данные ЗУ можно применять полностью или каскадными секциями.

Из российских разработок можно отметить рекламируемый фирмой Svetlana Elektropribor joint Stock Company МШУ с защитой от импульсов большой мощности в трехсантиметровом диапазоне волн со следующими параметрами:

- полоса рабочих частот – 12 %;
- входная импульсная мощность – 1,5 кВт (с охлаждением), средняя мощность – 300 Вт;
- входная импульсная мощность – 300 Вт (без охлаждения), средняя мощность – 75 Вт, коэффициент шума – 3 дБ;
- коэффициент усиления – 25 дБ;
- время восстановления – 0,5 мкс;
- габариты 160 × 60 × 60 мм.

Одним из вариантов обеспечения самозащиты СВЧ-приемников является применение достижения российских разработчиков – электрически прочного малошумящего электростатического усилителя (ЭСУ). Впервые в отечественной литературе С.П. Кантюком и Ю.А. Будзинским представлены в открытой печати ЭСУ, работающие на быстрой циклотронной волне электронного потока без устройств защиты от внешних перегрузок [10].

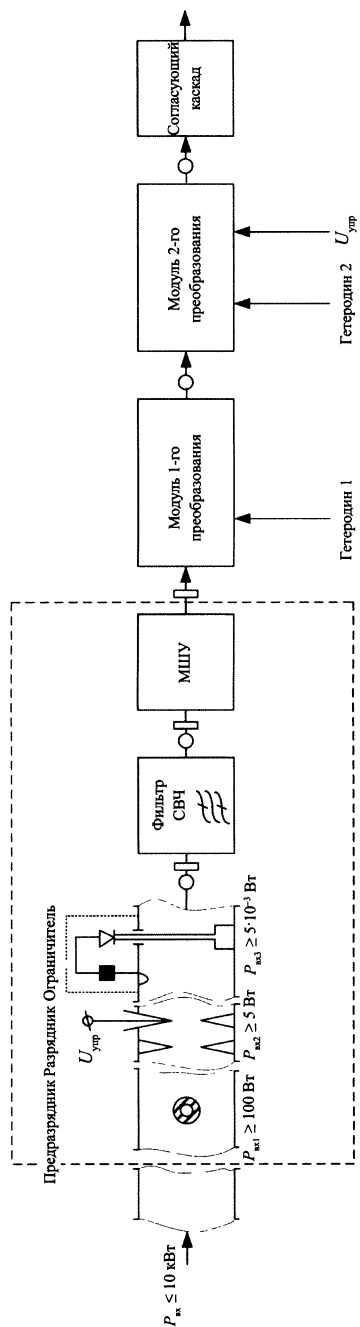


Рис. 2. Вариант схемы канала СВЧ-приемника

ЭСУ является электровакуумным прибором, в котором передача СВЧ-сигнала в электронный поток, его усиление и съём в выходную нагрузку происходят в результате циклотронного резонанса электронного потока и принимаемого сигнала. В ЭСУ сформированный электронной пушкой ленточный электронный поток проходит зазор резонатора элемента связи с поступившим в него сигналом. Соответственно, резонатор, настроенный на частоту сигнала, находится в расчетном фиксированном магнитном поле, определяющем частоту циклотронных колебаний электронного потока. Рабочие сигналы заданной частоты в зазоре резонатора возбуждают поперечное к электронному потоку синхронно изменяющееся электрическое поле. Если частота сигнала близка к циклотронной частоте потока, происходит преобразование энергии сигнала в энергию вращения электронного потока. После входного резонатора электронный поток проходит усилительную секцию, представляющую собой периодическую электростатическую структуру. Усиление циклотронных колебаний электронного потока достигается при синхронизации циклотронного движения электронного потока с полями структуры. Физически усиление проявляется в экспоненциальном росте энергии поперечных колебаний электронов за счет соответствующего уменьшения энергии продольного движения электронов, полная кинетическая энергия электронов сохраняется. В выходном элементе связи усиленный сигнал из электронного потока поступает в выходную нагрузку. Отработанный электронный поток оседает на коллекторе ЭСУ. ЭСУ – малoshумящий СВЧ-усилитель. Основным источником шумов в ЭСУ являются шумы электронного потока, потери во входной части и резонаторе, которые могут быть снижены в области электронной пушки за счет магнитного потока. Шумовая температура прибора в этом случае

$$T_{\text{мин}} = T_{\phi} \cdot (B_{\kappa} / B_{\rho}),$$

где T_{ϕ} – физическая температура катода ($\sim 1\,000\text{ }^{\circ}\text{K}$);

B_{κ} – индукция магнитного поля в области катода;

B_{ρ} – индукция магнитного поля в области циклотронного резонанса.

В разрабатываемых ЭСУ значение B_{κ} / B_{ρ} может достигать 0,1–0,2, что определяет $T_{\text{мин}} \approx 100\text{--}200\text{ }^{\circ}\text{K}$.

Прибор обладает значительной электрической прочностью, так как при поступлении на входной резонатор ЭСУ СВЧ-мощности более 10^{-2} Вт, то есть превышающей мощность электронного потока прибора, проходящего через тот же резонатор, электронный поток рассыпается и оседает на входном резонаторе. Связь сигнала с выходом прекращается (ослабление более 60 дБ). Так как коэффициент стоячей волны (КСВ) входа резонатора резко увеличивается до 20–30, обеспечивается отражение более 90 %

поступающей мощности. Таким образом, в едином приборе осуществляются защита последующих элементов СВЧ-приемника, селекция, обеспечивающая подавление сигналов зеркальных частот на величину ≥ 60 дБ и усиление рабочих сигналов с малым коэффициентом шума.

В последнее время в качестве входных устройств пеленгационных и компенсационных каналов СВЧ-приемников используются электростатические комплексированные усилители (ЭСКУ) и циклотонно-защищенные комплексированные усилители (ЦЗКУ), в которых с целью уменьшения размеров усилительной структуры оптимальным образом включается каскад транзисторного усилителя (ТРУ).

Реально достигаемые параметры ЭСКУ, ЦЗКУ:

- коэффициент шума ≤ 3 дБ;
- полоса пропускания ≥ 300 МГц;
- коэффициент усиления – 30 дБ;
- допустимая импульсная мощность – 5 кВт ($\tau_{\text{и}} = 100$ мкс, $Q_{\text{и}} = 20$);
- допустимая средняя мощность – 300 Вт;
- время восстановления – 15 нс.

Наиболее приемлемые результаты можно получить, используя отдельное циклотронное защитное устройство (ЦЗУ) [7], при установке последующего ТРУ с наименьшим коэффициентом шума и максимальным усилением. В этом случае можно снизить общий коэффициент шума входа СВЧ-приемника до 2 дБ при расширении полосы пропускания до 500 МГц. Реальная амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) приборов ЭСУ, ЭСКУ, ЦЗКУ в диапазоне частот $f_p \pm 2,5$ ГГц аналогична (рис. 3).

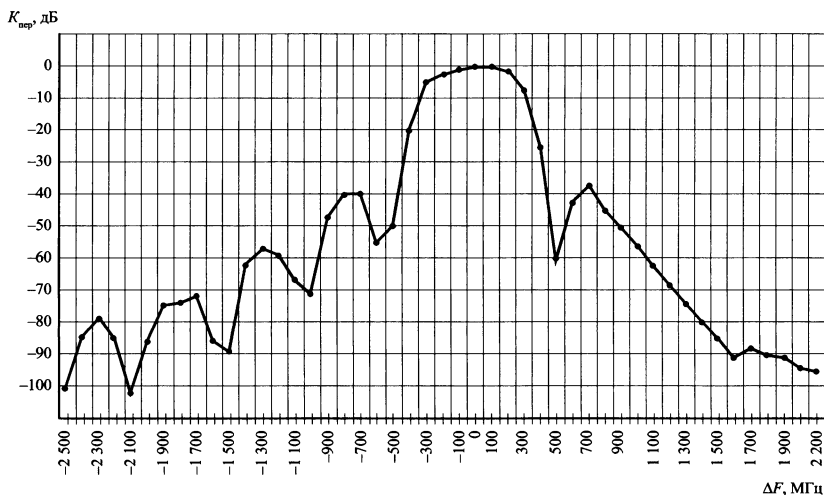


Рис. 3. Типовая АЧХ ЦЗУ и ЭСКУ

Одним из ключевых этапов работы является получение достаточного линейного динамического диапазона усиления СВЧ-приемника.

Современные сверхвысокочастотные малошумящие транзисторные и другие полупроводниковые усилители имеют ограничение по верхней границе линейности динамического диапазона на уровне 10^{-5} Вт.

Задача расширения динамического диапазона может быть решена одним из традиционных способов:

- командным включением заданного ослабления сигнала на входе СВЧ-приемника линейным ослабителем;
- введением временной регулировки усиления;
- введением отрицательных обратных связей в каскадах входных усилителей;
- переходом работы СВЧ-приемника на диссипативно связанные отводы каналов.

Реализация перечисленного комплекса мер обеспечивает пропорциональное увеличение входных вносимых потерь СВЧ-приемника.

В последних разработках малошумящих ЭСКУ, ЦЗКУ увеличен динамический диапазон приема рабочих сигналов. Разработаны варианты схем, обеспечивающие простое и надежное управление потенциальными режимами СВЧ-усилителей. В результате верхний уровень ДД может быть командно расширен на 10–15 дБ, то есть линейность усиления СВЧ-приемника доведена до $5 \cdot 10^{-4}$ Вт. Данный режим ухудшает коэффициент шума приемника не более чем на 2 дБ.

Кроме этого, рассматриваемые МШУ допускают их бланкирование путем подачи управляющих напряжений на усилительную структуру, что решает проблему устранения отрицательного влияния на приемник проникающей через СВЧ-усилитель части зондирующего сигнала, являющегося причиной увеличения низкочастотных шумов, нелинейных искажений в МШУ и переходных процессов в последующих элементах приемников при уровнях сигналов, значительно превышающих пороги ограничения.

В РЛС, использующих АФАР с большим количеством приемных модулей (10000 и более), динамический диапазон по входу суммирующего устройства увеличивается по сравнению с малоканальным приемником. Это увеличение верхней границы линейного усиления сигналов по входу вызывает необходимость проведения соответствующих работ по увеличению ДД последующих цепей СВЧ-приемника.

Наибольшие трудности возникают в цепях СВЧ-смесителей, которые с учетом особенностей функционирования строятся по балансным и би-балансным схемам или посредством изменения рабочих режимов.

Для обеспечения требуемого подавления помех по побочным каналам приема в диапазонном СВЧ-приемнике применяются различные варианты волноводных фильтров, диэлектрических резонансных селективных устройств на магнитостатических волнах и т. п. Однако перечисленные устройства обладают достаточно большими вносимыми потерями. Поэтому для обеспечения предварительного формирования входной полосы пропускания СВЧ-приемника и подавления сигналов зеркальных частот и внеполосных каналов на величину более 60 дБ, при малом коэффициенте шума, совместно с ЭСКУ желательно использовать преобразователь СВЧ-сигналов на высокую первую промежуточную частоту со схемой фазового подавления сигналов зеркальных частот. Такой вариант схемы обеспечивает диапазонную работу СВЧ-приемника без механических или электрических перестроек элементов входа с выполнением требований электромагнитной совместимости средств, практически не ухудшая общего коэффициента шума СВЧ-приемника. При построении схемы СВЧ-приемника с двойным преобразованием частоты подавление сигнала второй зеркальной частоты возможно обеспечить введением в усилитель первой промежуточной частоты полосно-пропускающего фильтра, формирующего полосу по первой промежуточной частоте, а при необходимости и фильтра подавителя второго зеркального канала, а также схемы ФПЗЧ на втором смесителе.

Для обеспечения достаточной точности пеленгации координат целей и ракет и заданного уровня компенсации активных шумовых помех РЛС необходимы выравнивание коэффициентов усиления и электрических длин приемных каналов СВЧ-приемника, обеспечение допустимой неравномерности полос пропускания каналов. Для диапазонных приемных каналов РЛС, осуществляющих работу при скачках несущей частоты, перечисленные характеристики должны быть обеспечены во всем рабочем диапазоне частот.

Указанные условия являются трудновыполнимыми, поскольку существует ряд дестабилизирующих факторов, прямо или косвенно влияющих на перечисленные параметры. К ним относятся воздействие климатических и механических факторов, нестабильность источников питания и особенно воздействие на входы МШУ мощных зондирующих сигналов, приводящих к увеличению времени переходных процессов в рабочих промежутках между зондирующими импульсами.

Каждый из этих факторов требует разработки ряда конструкторских, технологических и схемных решений. В результате взаимного согласования требований к электрическим длинам каналов, их импедансным и дисперсионным характеристикам трактов, стабилизирующим схемам активных элементов (в частности ЭСКУ), а также управляющим схемам

возможно параметрически обеспечить относительную амплитудную и фазовую нестабильности каналов менее ± 1 дБ и $\pm 10^\circ$. Возможно введение автоматической подстройки этих параметров в цифровом блоке обработки сигналов.

В табл. 3 показаны сравнительные характеристики рабочих СВЧ-приемников, использующих в качестве входного элемента ЭСКУ или эквивалентную замену, состоящую из других представленных ранее отдельных узлов (ЗУ, МШУ, полосового фильтра).

Сравнение СВЧ – приемного канала с ЭСКУ на входе и его эквивалентной замены, в частности ЗУ-В35516 плюс, девятизвенного полосового фильтра и МШУ, разработанных фирмой Miteg, показывает, что вариант с ЭСКУ имеет явное преимущество, предпочтителен в разработке диапазонной МРЛС (см. пункты 4, 6, 7, 9, 11, 12 табл. 3).

Таблица 3

Характеристики СВЧ-приемников

№	Параметры СВЧ-приемника	Размерность	При использовании ЭСКУ во входной части приемника	При использовании трех отдельных узлов во входной части приемника
1	Диапазон частот	МГц	$f_0 \pm 5 \%$	$f_0 \pm 5 \%$
2	Полоса пропускания по входу	МГц	200–400	~400
3	Коэффициент шума	дБ	3–5	5,5–6
4	Электрическая прочность по входу			
	по импульсной мощности	кВт	5–10. При любых воздействиях не требует управления	5 –10 – командное управление
	по непрерывной мощности	Вт	300	100–200
5	Величина предельной проникающей мощности на входе последующего МШУ или смесителя	мВт	10–50	10–50

Окончание табл. 3

№	Параметры СВЧ-приемника	Размерность	При использовании ЭСКУ во входной части приемника	При использовании трех отдельных узлов во входной части приемника
6	Время восстановления чувствительности	мкс	$\leq 0,05$ во всех режимах	0,7–0,8 в пассивном режиме; 0,2–0,3 – управление от передатчика РЛС
7	Входная мощность в режиме линейного усиления	Вт	$2 \cdot 10^{-5}$ в пассивном режиме; 10^{-3} с управлением по усилительной структуре	10^{-5} во всех режимах
8	Подавление сигналов зеркальных частот	дБ	> 70	< 70 при постановке полосно-пропускающего фильтра, подавляющего сигналы зеркальных частот
9	Относительная нестабильность коэффициентов передачи и разности фаз двух любых каналов			≤ 2
	ΔK	дБ	$\leq 1,0$	≤ 25
	$\Delta \varphi$	Град.	≤ 10	$\leq 1,4$
	КСВ по входу		$\leq 1,4$	
10	Рабочий ресурс входного прибора	Часы	4 000–5 000	$< 2 000$
11	Минимальный срок сохранения параметров входного прибора	Годы	15	Сведения отсутствуют

6. УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЗАЩИТЫ И ЭМС СВЧ-ПРИЕМНИКОВ РЛС

В существующих и проектируемых многоканальных РЛС, использующих в АФАР до 30 000 антенных приеме-передающих модулей, в пеленга-

ционные и компенсационные приемные каналы, стоящие после активных фазированных антенных решеток, проникают значительные уровни мощности от передающих каналов и сильных отраженных сигналов и помех.

В контексте усовершенствования защиты и ЭМС СВЧ-приемников ключевыми вопросами являются:

- защита входных сигналов СВЧ-приемника;
- обеспечение заданной линейности динамического диапазона приемника по входу аналоговой части при наличии действующих помех;
- согласование требований ЭМС по подавлению зеркальных, побочных и внеполосных помех с условиями диапазонной работы РЛС.

При этом необходимо обеспечить заданные характеристики:

- низкий коэффициент шума СВЧ-приемника;
- минимальное время восстановления параметров СВЧ-приемника после воздействия предельной СВЧ-мощности;
- реальное конструктивное размещение аппаратуры.

Перечисленные проблемы актуальны в отношении МРЛС с ФАР и АФАР, передающих принятые антенной системой сигналы в пеленгационные (суммарный и разностные) каналы. Решением указанных проблем может стать введение в каждый приемный канал, работающий с выхода АФАР, ряда элементов:

- электропрочного защитного устройства, построенного на других принципах, обеспечивающего работу при повышенной до 10 Вт входной мощности;
- быстродействующего ($< 0,1$ мкс) управляемого электронно-цифрового аттенюатора (ЭЦА) для расширения динамического диапазона по входу;
- частотно-полосового подавителя сигналов диапазона зеркальных, побочных и внеполосных помех.

Рассмотрим стандартно реализуемые технические характеристики указанных устройств.

• Полупроводниковое защитное устройство

Наиболее распространенным среди ЗУ подобного класса является защитное устройство ограничительного типа на полупроводниковых диодах, построенное на принципе обратимого пробоя (протекания тока через диод при значительном уровне мощности СВЧ, подводимой к его электродам). Минимальный уровень мощности, при котором обычно срабатывают пассивные ЗУ, составляет десятки мегаватт, что гарантирует сохранность последовательно включенных ЭЦА и СВЧ-смесителя. Например, ЗУ, построенное на современных отечественных диодах, обладает следующими техническими характеристиками:

- допустимая мощность на входе – (5–10) Вт;
- начальные потери < 1,2 дБ;
- ослабление запырания – (25–30) дБ.

В разработке находятся полупроводниковые ЗУ с более высоким показателем электропрочности.

• Фильтр зеркальной частоты

Для сохранения заданной диапазонной работы СВЧ-приемника, функционирующего в трехсантиметровом диапазоне, с высоким значением первой промежуточной частоты можно использовать фильтр высокой частоты (ФВЧ), являющийся запредельным для сигналов зеркальной частоты. ФВЧ обеспечивает подавление зеркальной частоты, отстоящей от рабочей частоты на 1 000 и более мегагерц, в рассматриваемом диапазоне ~30 дБ при длине запредельного волновода ~60 мм, а с учетом ступенчатых переходов – до 80 мм.

• Электронно-цифровой аттенюатор

Для расширения динамического диапазона может применяться ЭЦА, построенный на отечественных диодах. Электронно-цифровой аттенюатор российского производства имеет допустимую непрерывную мощность рассеяния 0,15 Вт при $T = +65$ °С. При подаче управляющих напряжений ЭЦА может иметь:

- потери в режиме пропускания $\leq 1,0$ дБ;
- потери в режиме ослабления – $(15 \pm 1,5)$ дБ;
- коэффициент стоячей волны ≤ 2 ;
- время переключения ~ 0,1 мкс.

Суммарные потери рассматриваемой группы функциональных устройств составляют ~2,5 дБ.

Общее подавление зеркальных и других побочных частот (с учетом подавления в СВЧ-смесителе со схемой ФПЗЧ) достигает ~40 дБ.

Значительные потери и инерция быстрогодействия ЭЦА, устанавливаемых на вход СВЧ-приемника, и сложности в управлении обуславливают необходимость разработки других вариантов защитно-селективного устройства.

• Защитно-селективное устройство

Одним из альтернативных вариантов защиты входов РЛС являются циклотронные защитные устройства, основанные на принципе циклотронного резонанса в электронном, но не имеющие усилительной структуры.

Рассмотрим описание и схему ЦЗУ.

Ленточный электронный поток в приборе, формируемый миниатюрным электронным пучком, дрейфующим в однородном магнитном поле фокусирующей системы, последовательно проходит входной резонатор, согласующую секцию, выходной резонатор и поступает на коллектор (рис. 4).

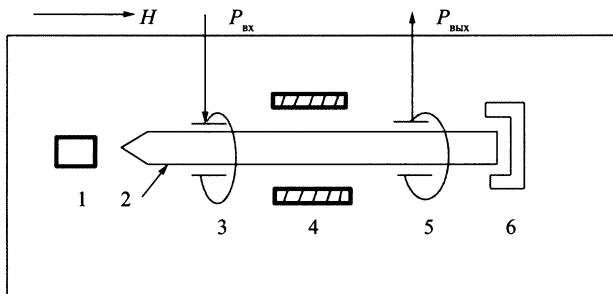


Рис. 4. Схема ЦЗУ: 1 – формирователь электронного луча, создающий электронный поток; 2 – поток электронов в однородном магнитном поле; 3 – входной резонатор с протяженным входным зазором; 4 – фазосдвигающая секция (согласователь); 5 – выходной резонатор; 6 – коллектор

Во входном резонаторе с протяженным емкостным зазором при совпадении частоты поступающего СВЧ-сигнала с циклотронной частотой вращения электронов пучка, организованного магнитным полем и собственной частотой резонатора, происходит эффективное преобразование энергии входного сигнала в энергию вращения электронного потока. Между входным и выходным резонаторами располагается согласующая фазосдвигающая секция, осуществляющая фазовый сдвиг в приборе, оптимальный для согласования с выходным резонатором. С него сигнал выводится в тракт приемника.

Когда мощность проникающего на вход ЦЗУ СВЧ-сигнала начинает превышать мощность электронного потока (5–10) мВт, электронный поток, рассыпаясь, оседает на ламелях входного резонатора. Мгновенно нарушается связь по потоку с выходным резонатором, и поступление СВЧ-сигнала на выход прекращается, возрастает КСВ входа сигнала, отражая поступающую мощность.

Применение данного ЦЗУ предоставляет принципиально новые возможности.

Защитные характеристики входа

Степень защиты ЦЗУ зависит от пробоя действующего зазора входного резонатора. В разработках ЭСУ, ЭСКУ на специализированном

предприятия входной зазор резонатора составляет (0,15–0,2) мм. Известно, что в вакууме пробивное напряжение $U_{\text{макс}}$ для зазора величиной 0,15 мм расчетно равно 15 кВ (реальное значение – не менее 7,5 кВ).

Допустимая мощность на входе ЗУ с учетом характеристических параметров его входа будет составлять

$$P_{\text{доп}} = \frac{U_{\text{макс}}^2}{4 \cdot \eta \cdot \rho \cdot Q},$$

где ρ – характеристическое сопротивление резонатора, $\rho \approx 80$ Ом;

Q – резонаторы, $Q = 15$;

$\eta = 0,95\text{--}0,98$ (КПД резонатора);

$U_{\text{макс}}$ – величина пробойного напряжения в вакуумном зазоре.

Отсюда $P_{\text{доп}} \approx 12$ кВт.

Очевидно, что запас по степени защиты входа прибора дает возможность уменьшить зазор резонатора до необходимых значений или увеличить потенциальную характеристику прибора для работы с более интенсивными силовыми воздействиями от собственного передатчика или внешних помех. Реальные значения полученных параметров демонстрируют сохранность характеристик ЦЗУ и дальнейшего приемного тракта при форс-мажорных обстоятельствах, в том числе при попадании на вход циклотронного защитного устройства сверхмощных импульсов ЭМИ с $\tau \geq 5\text{--}10$ нс.

В режиме защиты (при отсутствии электронного пучка между входным и выходным резонаторами) ослабление СВЧ-мощности от входа к выходу ЦЗУ превышает 60 дБ, то есть при входной мощности 10 кВт на его выходе мощность будет составлять $P_{\text{вых}} \leq 10^{-2}$ Вт, что обеспечивает нормальную работу СВЧ-смесителей приемных каналов.

Динамический диапазон

При приеме СВЧ-сигналов в рабочей полосе ЦЗУ в пределах его динамического диапазона (от собственных шумов до величины входной мощности 3–5 мВт) сохраняется малое значение КСВ, входа, вся приходящая мощность рабочих сигналов взаимодействует с электронным потоком.

Таким образом, возможно обеспечение линейности верхней области динамического диапазона ЦЗУ вплоть до $P_{\text{лин}} = 10^{-3}$ Вт, что на два порядка выше, чем в предыдущих схемах.

Время восстановления

Время восстановления параметров ЦЗУ после воздействия предельного импульса СВЧ-мощности определяется как время затухания

СВЧ-колебаний во входном резонаторе от максимального значения до шумовых колебаний.

Расчетное время восстановления параметров по максимальной чувствительности будет соответствовать

$$\tau_v = \frac{Q_n}{2 \cdot \pi \cdot f_p} \frac{4 \cdot \text{КСВ}_x \cdot P_{\text{имп}}}{(\text{КСВ}_x + 1)^2 \cdot \sqrt{P_{\text{осед}} \cdot P_{\text{лин}}}},$$

где Q_n – нагруженная добротность резонатора;

f_p – центральная частота рабочего диапазона;

КСВ_x – КСВ входа прибора при «холодном» (без электронного пучка) входном резонаторе;

$P_{\text{имп}}$ – предельно допустимая входная импульсная мощность;

$P_{\text{осед}}$ – входная мощность, при которой весь электронный пучок оседает на ламелях резонатора;

$P_{\text{лин}}$ – максимальная входная мощность в линейном режиме.

Задавая $Q_n = 25$, $\text{КСВ}_x = 25$, $P_{\text{осед}} = 10$ мВт, $P_{\text{лин}} = 3\text{--}5$ мВт, получаем $\tau_v \approx 5$ нс.

Полученные значения времени восстановления приборов превосходят лучшие современные характеристики ЗУ.

Шумовая температура в рабочей полосе пропускания

Шумовая температура ЦЗУ определяется так же, как и в ЭСУ, двумя факторами:

- диссипативными потерями сигнала в ЦЗУ;
- шумовым вкладом электронного потока.

Расчетное значение $T_{\text{ш}} \approx 200$ °К.

Однако теоретическая модель прибора определяет, что при оптимальных параметрах импедансов электронного потока и входного резонатора в нем происходит дальнейшее охлаждение электронного потока за счет отсеивания электронов с хаотическими и другими асинхронными скоростями, его шумовой вклад может быть эквивалентен пассивным потерям, то есть не должен превышать 1 дБ.

Сравнение ЦЗУ с используемой группой функциональных устройств (ЗУ, ФВЧ, ЭЦА) показывает его существенное преимущество по вносимым потерям $P_{\text{вн}}$, составляющее примерно 2,5 дБ.

Подавление зеркальных, побочных и внеполосных помех

Обеспечение диапазонной работы СВЧ-приемника в составе АФАР обуславливает необходимость проектировки именно широкополосного приемника, то есть применения схемы с открытым входом. Однако такое

построение изначально ухудшает характеристики ЭМС радиолокатора в целом.

Особенно опасной является посторонняя помеха, оказавшаяся на входе СВЧ-приемника в любой точке вне рабочего диапазона, которая может ввести приемник в ограничение.

Разработка АФАР с большим количеством прямо-передающих каналов улучшает линейную динамическую характеристику приема сигналов по сравнению с малоканальным приемником. Улучшение пропорционально количеству каналов, размещенных на площади раскрытия антенны. Соответственно, приемные каналы после АФАР будут иметь увеличенный динамический диапазон приема. Однако попадание помехи на зеркальный канал сразу ухудшит чувствительность СВЧ-приемника.

Поэтому требования ЭМС по режекции паразитных сигналов, в частности по подавлению зеркальных и внеполосных помех, должны быть перенесены на аналоговые приемные каналы после АФАР.

В настоящее время действуют требования к проверке качества приемных устройств радиолокационных средств по подавлению помех в зеркальных и других каналах:

- мировой стандарт MIL STD-469B ≥ 50 дБ;
- российский ГОСТ РВ 5801-001-2008 – 50–70 дБ (для различных классов РЛС).

Рассмотрение механизма подавления сигналов зеркальных частот в ЦЗУ показало, что за счет улучшения взаимодействия сигнала с циклотронной частотой потока при выбранных характеристиках входного и выходного резонаторов можно обеспечить подавление более 70 дБ при отстройке от f_p на 1 000 МГц и более. Поэтому желательно обеспечить значительный номинал первой промежуточной частоты СВЧ-приемника, например, $f_{пч1} \geq 1\,000$ МГц.

Типовая АЧХ ЦЗУ в рассматриваемом диапазоне частот аналогична по форме АЧХ ЭСКУ (рис. 3, глава 8).

Общее подавление ($P_{под}$) зеркальных и других побочных частот (с учетом подавления в СВЧ-смесителе со схемой ФПЗЧ при заданной высокой промежуточной частоте 1 000 МГц) может достигнуть 80 дБ. Таким образом, современные требования ГОСТ выполняются.

Проведенные теоретические исследования и разработка опытных образцов прибора показали, что по сравнению с ранними вариантами построения приемных каналов СВЧ-приемника включение ЦЗУ имеет явное преимущество по всем техническим характеристикам, в том числе и в сравнении с рекламируемыми фирмой EEV Ltd «Microwave products» плазменными ЗУ. Ряд параметров ($P_{лин}$, $P_{имп}$, τ_v) приобретает уникальные значения. Особенно этот фактор важен при сильных несинхронных

воздействующих на СВЧ-приемник помехах, в частности при дуэльных ситуациях, когда практически все другие защитные устройства могут быть разрушены. Введение ЦЗУ в состав аналоговых приемных каналов многоканальных АФАР существенно улучшает комплекс основных технических характеристик СВЧ-приемников МРЛС и, соответственно, их помехозащиту.

Разработанные приборы ЦЗУ обладают комплексом уникальных характеристик, обеспечивающих многолетнюю работу будущих РЛС, объединяя функции:

- защиты СВЧ-приемника от современных мощных (в том числе несинхронных) и ЭМИ-воздействий на его вход;
- практически мгновенного переключения режимов «прием – передача»;
- предварительной селекции СВЧ-сигналов.

Результаты проверки реализованных производственных образцов показывают:

- коэффициент шума на рабочих частотах диапазона составляет 1,1–1,2 дБ;
- потери сигнала (в режиме малого сигнала, в рабочей полосе) ≤ 1 дБ;
- верхняя граница линейности $P_{\text{лин}} \geq 10^{-3}$ Вт.

Электрическая прочность, время восстановления и другие характеристики обусловлены конструкцией в случае использования элементов, уже выпускаемых промышленностью для других ЭСУ, ЭСКУ (формирователь луча, параметры входного и выходного резонаторов).

7. ТЕХНИЧЕСКИЕ НЕСОВЕРШЕНСТВА УЗЛОВ СВЧ-ПРИЕМНИКА – УХУДШЕНИЕ КАЧЕСТВА РАБОТЫ МРЛС

Аппаратура СВЧ-приемника должна иметь параметры, не зависящие от внешних условий и воздействий на РЛС, изменяющихся в динамическом диапазоне приема сигналов и внешних помех. Для выполнения указанных условий в ДД приемника необходимо обеспечить достаточное превышение средней мощности полезного радиосигнала над мощностью поступающего флуктуационного или внутреннего теплового шума в заданной частотной полосе приемника, а также необходимые точностные характеристики.

Статистическая связь шумов с выхода антенного устройства и собственных шумов СВЧ-приемника аддитивна.

Среднее значение номинальной мощности флуктуационного шума, независимо от причин его возникновения, на входе СВЧ-устройств приема

определяется суммой дифференциальных шумовых мощностей отдельных узлов в пределах полосы Δf , ограниченной частотами f_1 и f_2 :

$$P_{\text{ш вк}} \approx K \cdot T_0 \int_{f_1}^{f_2} t_{\text{ш р}}(f) \cdot df \approx N \cdot \Delta f_p,$$

где $N = K \cdot T_0 \cdot t_{\text{ш р}}$ – равномерный (частотно-независимый) энергетический спектр, обрезанный в полосе приема частот $f_1 - f_2 = \Delta f_p$;

$t_{\text{ш р}}$ – среднее значение относительной шумовой рабочей температуры приемной системы в промежутке частот f_1 и f_2 . В идеале это прямоугольник с основанием $\Delta f_p = f_1 - f_2$, площадь которого равна площади, ограниченной функцией $t_{\text{ш р}}$ и точками f_1 и f_2 , где действует флуктуационный шум с равномерным энергетическим спектром.

Таким образом, под шумовой полосой приема частотно-зависимого сигнала понимается полоса пропускания идеального полосового фильтрующего узла (элемента) с коэффициентом передачи по напряжению $K_{\text{н}} j2\pi\Delta f_p$, где $K_{\text{н}}$ – коэффициент передачи по напряжению. Шумовая полоса определяется из условия равенства дисперсий входного шума на выходах идеального и реального фильтрующих узлов:

$$\Delta f_{\text{ш}} = \int_0^{\infty} \left[\frac{K_{\text{н}} j2\pi f}{K_{\text{нр}} j2\pi f_p} \right]^2 df_{\text{ш}}.$$

Частотный интервал, определяемый значением $df_{\text{ш}}$, как бы вырезает часть энергетического спектра широкополосного шума, поступающего на вход нешумящего входного СВЧ-тракта. Именно эта часть флуктуационного шума после прохождения нешумящего тракта и является аддитивным шумом, на фоне которого полезный радиосигнал после усиления СВЧ-приемником попадает на вход оконечного устройства временной обработки сигналов. Не все функциональные узлы и элементы входного СВЧ-тракта имеют шумовые полосы, равные его шумовой полосе. В реальных структурах входных элементов присутствуют различного рода устройства, шумовые полосы которых отличаются от шумовой полосы всего высокочастотного тракта. Расчет ведется по наиболее узкополосному элементу, определяющему выходную полосу сигналов. Учет шумов за пределами выбранной шумовой полосы устройств производится в тех случаях, когда необходимо принять во внимание процессы взаимодействия шумов с какими-либо сигналами, частоты которых не попадают в шумовую полосу тракта (в частности, это актуально в контексте вопроса ЭМС). Перечисленные процессы обуславливают как преобразование шумов в рабочую полосу пропускания тракта, так и искажения спектра полезного радиосигнала. Взаимодействие шума с сигналами возникает

в устройствах, содержащих нелинейные элементы. При анализе процессов взаимодействия шума с сигналами в подобных устройствах учитываются рабочие полосы пропускания и шумовые полосы всех устройств, устанавливаемых в высокочастотном тракте до рассматриваемого элемента.

При инженерных расчетах обычно используется величина нормированной АЧХ четырехполосника, представляющей собой частотную зависимость

$$\frac{K_{\text{н}} j 2 \pi f}{K_{\text{нр}} j 2 \pi f_{\text{р}}}.$$

Типичные зависимости нормированных коэффициентов передачи полосно-пропускающих четырехполосников представлены на рис. 5 а, б.

Рис. 5 а иллюстрирует случаи симметричной АЧХ относительно частоты $f_{\text{р}}$ при нормированном модуле коэффициента передачи.

Рис. 5 б иллюстрирует несимметричные относительно $f_{\text{р}}$ частотные зависимости номинально реализуемых коэффициентов передачи.

Шумовая полоса $\Delta f_{\text{ш}}$ на указанных рисунках представляет собой частотный интервал, численно равный основанию прямоугольника с единичной высотой, площадь которого ограничена $t_{\text{шр}}$. Шумовая полоса всегда больше нормированной АЧХ. Полоса и форма $\Delta f_{\text{ш}}$ часто определяют важные характеристики МРЛС, особенно ЭМС.

Реальные конструкции полосно-пропускающих устройств в редких случаях имеют симметричные относительно частоты $f_{\text{р}}$ частотно-зависимые коэффициенты передачи в полосе $\Delta f_{\text{ш}}$. Несовершенства частотно-зависимых узлов определены качеством их исполнения и неспособностью выдержать необходимые допуски конструкций. Более того, недостатки исполнения функциональных узлов являются причинами сдвигания пеленгационных характеристик многоканальных моноимпульсных систем, а также влияют на нормальное функционирование приемника и устройства обработки сигналов с проявлением дополнительных неосновных каналов приема.

Кроме того, в таких узлах, как УВЧ, смеситель, гетеродин, содержащих разного вида нелинейности, при воздействии на их вход радиосигналов возникают и другие нелинейные явления, когда помеховые радиосигналы проникают в устройства даже в случаях несовпадения их частот с частотами основных и побочных каналов, например, на краях шумовой полосы $\Delta f_{\text{ш}}$, и оказывают мешающее действие за счет шумовой модуляции мощных входных внеполосных сигналов спектром шумов гетеродина. При этом изменяется соотношение полезных сигналов и шумов, уменьшая уровень «сигнал/шум».

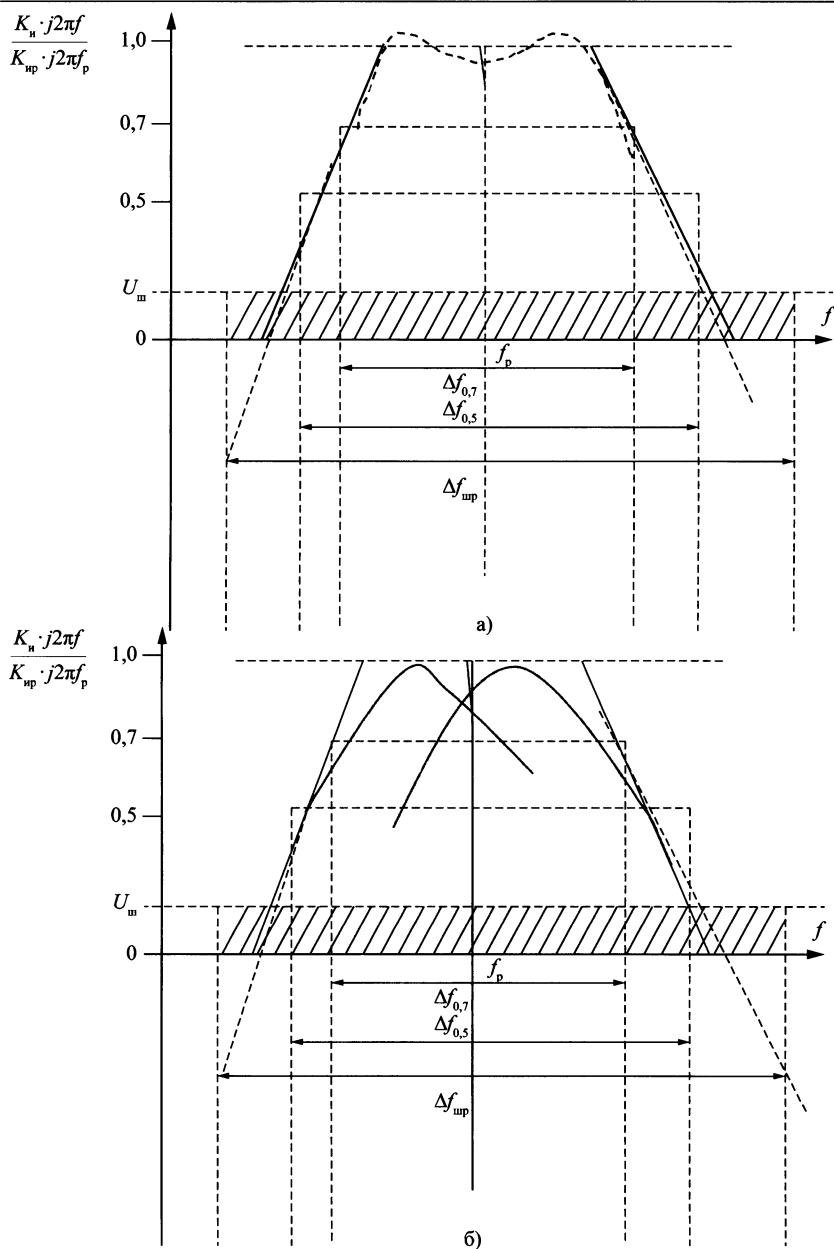


Рис. 5. Нормированный коэффициент передачи четырехполюсника:
а) при симметричной АЧХ; б) при несимметричной АЧХ

«Сигнал/помеха» при несовершенствах преобразования детектируется, изменяя режимы усилительных элементов, снижая их динамические характеристики приема, то есть меняется коэффициент передачи этого узла. Шумовые модуляции помехи, полученные за счет шумов гетеродина, также приводят к уменьшению энергетического соотношения «сигнал/шум», то есть технические несовершенства узлов могут значительно ухудшить выходной сигнал СВЧ-приемника. Указанные явления более отчетливо проявляются при нерациональном выборе промежуточной частоты.

Таким образом, в СВЧ-приемнике допуски на нестабильности АЧХ должны быть минимальны, а несовершенства амплитудно-частотных и фазо-частотных (ФЧХ) характеристик сведены к минимуму. При этом необходимо обеспечить оптимальные переходные импульсные характеристики. Допуски на их нестабильность также должны быть минимальны. Приемник должен иметь достаточный диапазон настройки и перестройки без ухудшения требуемых рабочих характеристик. Для реализации заданных избирательных характеристик в МРЛС (см. главы 8, 9 настоящей монографии) используются как пассивные фильтры (преселекторы), так и активные элементы, обеспечивающие электронное подавление нежелательных частот.

Преселекторы СВЧ, предназначенные для выполнения функций предварительной избирательности приемника, должны обладать симметричной характеристикой АЧХ (рис. 5а) с минимальными входными потерями.

В качестве входных электропрочных (необходимых для МРЛС) и обладающих возможностью регулировки симметричности АЧХ фильтров наиболее часто используются двухконтурные резонаторы (см. главу 9 настоящей монографии), обладающие возможностью симметрирования и настройки на плоскую вершину для получения необходимых для идентификации параметров приемных каналов многоканальных систем.

В новейших разработках во входных цепях СВЧ-приемников используется совокупное сочетание селективных и других свойств защитных, усилительных приборов, например, ЭСКУ, ЗУ, рассмотренных в главах 9, 10.

Обеспечение стабильности фазо-частотных характеристик СВЧ-приемника в рабочих полосах пропускания также требует более детальных решений, особенно для многоканальных моноимпульсных РЛС, работающих с ФАР и АФАР. Стабилизация амплитудно-фазо-частотных (АФЧХ) и импульсных переходных характеристик многоканальных СВЧ-приемников необходима практически во всех современных бортовых и наземных РЛС, определяющих угловые координаты с достаточной точностью, например, использующих моноимпульсные методы приема,

методы мгновенной равносигнальной зоны, парциальных диаграмм и т. д. Стабильность АФЧХ необходима как для обеспечения достаточной точности обработки сигналов, определения координат целей и ответчиков ракет, так и для получения заданного уровня компенсации активных помех в РЛС. Многоканальные системы, использующие для пеленгации радиолокационные методы мгновенной равносигнальной зоны, требуют выравнивания коэффициентов усиления и электрических длин приемных каналов СВЧ-приемника и обеспечения допустимой неравномерности полос пропускания каналов. Для диапазонных приемных каналов МРЛС, работающих при скачках несущей частоты, перечисленные характеристики должны быть реализованы во всем рабочем диапазоне частот. Указанные условия являются трудновыполнимыми, поскольку существует ряд дестабилизирующих факторов, прямо или косвенно влияющих на перечисленные параметры.

Факторами, вызывающими амплитудные и фазовые ошибки приемных каналов диапазонного СВЧ-приемника, являются:

- наличие неоднородностей в трактах передачи;
- производственная разница в сечениях волноводных трактов симметричных плеч каналов;
- допуск на размеры микрополосковых линий передачи;
- разброс подложек;
- изменение диэлектрических и механических свойств подложек, пластин и других регулировочных элементов трактов;
- резонансные элементы в трактах;
- несоответствие нормированных АЧХ, ФЧХ симметричности ветвей;
- нестабильность режимов работы СВЧ-смесителей и других активных узлов;
- нестабильность работы источников питания;
- климатические, механические и другие внешние факторы;
- воздействие на входы СВЧ-приемника мощных зондирующих сигналов, приводящих к увеличению времени переходных процессов в рабочих промежутках между зондирующими импульсами.

Каждый из перечисленных факторов требует разработки конструктивных, технологических и схемных решений. В результате согласования требований к электрическим длинам каналов СВЧ-приемника, их импедансам, дисперсионным характеристикам трактов, стабилизирующим схемам активных элементов, а также управляющим схемам в МРЛС можно обеспечить параметрически минимальные амплитудную $\Delta K \leq 1$ дБ и фазовую $\Delta \varphi \leq 10^\circ$ ошибки между приемными каналами. Возможна и автоматическая подстройка этих параметров.

Входные элементы передачи сильных сигналов от антенно-фидерного устройства (АФУ) на активные приемные узлы СВЧ-приемника представляют собой коаксиальные или волноводные конструкции. Рассмотрим нестабильности, вносимые ими в параметры СВЧ-приемника. В качестве примера покажем степень изменения наиболее тонкого параметра – сдвига ФЧХ волноводного тракта при наличии в нем минимум двух неоднородностей. Предположим, что неоднородности расположены на таком расстоянии друг от друга, при котором высшие типы волн, возникающие на первой неоднородности, затухают и не доходят до второй неоднородности (одноволновый режим). Это предположение позволяет использовать следующее соотношение.

Коэффициент передачи тракта без потерь

$$K_e = \frac{(1 - \Gamma_1) \cdot (1 + \Gamma_2)}{(1 - \Gamma_1 \cdot \Gamma_2 \cdot e^{-2\beta l})} e^{-j(\psi_1 + \psi_2 - \beta l - \alpha)},$$

где ψ_1 и ψ_2 – изменение фазы коэффициентов передачи первой и второй неоднородностей;

$\beta \cdot l$ – набег фазы сигнала на отрезке тракта длиной l ;

α – изменение фазы сигнала на отрезке тракта за счет переотражений от неоднородностей.

В общем виде ψ при фазе колебания φ на определенном отрезке линии передачи будет составлять

$$\psi = \arctg \frac{|\Gamma| \cdot \sin \varphi}{1 + |\Gamma| \cdot \cos \varphi} \approx \text{const.}$$

В небольшой полосе частот при хорошей отработке элементов можно считать условно постоянными параметры небольших неоднородностей (углов, штырей, диафрагм, переходных участков в микрополосках и т. д.).

Сдвиг фазы на заданном отрезке тракта l в диапазоне частот

$$\varphi_\lambda = \beta \cdot l = \frac{2\pi \cdot l}{\lambda_g} = \frac{2\pi \cdot l}{\lambda_0} \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda_0}{2a_b}\right)^2},$$

где a_b – поперечный размер волновода H_{10} .

Изменение фазы сигнала за счет переотражений от двух неоднородностей тракта

$$\alpha = \arctg \frac{|\Gamma_1| \cdot |\Gamma_2| \cdot \sin \xi}{|\Gamma_1| \cdot |\Gamma_2| \cdot \cos \xi},$$

где $\xi = \varphi_1 + \varphi_2 - 2\beta \cdot l$.

В результате суммарная крутизна фазо-частотной характеристики такого тракта с двумя неоднородностями, расположенными на расстоянии l , определяется выражением

$$\frac{d\psi_{\Sigma}}{df} = \left[\frac{d\psi_1}{df} + \frac{d\psi_2}{df} \right] \frac{2\pi \cdot l}{c} \frac{f}{\sqrt{f^2 - \frac{c^2}{4a_b^2}}} -$$

$$- \left[\arctg \frac{|\Gamma_1|^2 \cdot |\Gamma_2|^2 - |\Gamma_1| \cdot |\Gamma_2| \cdot \cos \left[\psi_1 + \psi_2 - \frac{4\pi \cdot l}{c} \sqrt{f^2 - \frac{c^2}{4a_b^2}} \cdot 4\pi \cdot l \cdot f \right]}{|\Gamma_1|^2 \cdot |\Gamma_2|^2 - 2|\Gamma_1| \cdot |\Gamma_2| \cdot \cos \left[\psi_1 + \psi_2 - \frac{4\pi \cdot l}{c} \sqrt{f^2 - \frac{c^2}{4a_b^2}} + 1 \right] \cdot c \sqrt{f^2 - \frac{c^2}{4a_b^2}}} \right].$$

Из этого выражения видно, что ФЧХ тракта с двумя неоднородностями ($\Gamma = \frac{КСВ-1}{КСВ+1}$; $\psi_{1,2} = \text{const}$) и ее крутизна в основном определяются

длинами трактов. Если пренебречь более мелкими влияниями, то эти неоднородности дают фазовый сдвиг, равный сумме фазовых сдвигов коэффициентов передачи каждой неоднородности с учетом дисперсионных характеристик трактов, а переотражения вносят нелинейности в фазо-частотную характеристику тракта.

Выражения дают возможность рассчитать сдвиг фаз сигналов между различными трактами (с учетом их допусков и импедансов) в зависимости от изменения температуры окружающей среды и других дестабилизирующих факторов.

Таким образом, для достижения требуемых минимальных значений относительной фазовой и амплитудной стабильности многоканальных трактов, оказывающих некоторое влияние на точность пеленгационных характеристик МРЛС систем зенитно-управляемого ракетного оружия (ЗУРО), необходимо, чтобы разность разностей электрических длин сигнального и гетеродинного трактов для всех пеленгационных каналов многоканального СВЧ-приемника была постоянной или стремящейся к нулю величиной. Допуск на разность разности электрических длин не должен превышать максимально допустимого расхождения $\Delta\phi$ с учетом дисперсионности трактов и разброса их входных и выходных импедансов в широком диапазоне частот и в условиях предельных климатических воздействий.

Другими не менее важными источниками нестабильности СВЧ-трактов для моноимпульсных РЛС являются активные узлы (УВЧ, смесители и др.).

Фаза и амплитуда сигнала с выхода усилителя СВЧ или УВЧ могут быть однозначно определены, если известен комплексный коэффициент передачи системы как функция частоты:

$$K_{\pi}(\omega) = A(\omega)e^{j\psi(\omega)},$$

где $A(\omega)$ – амплитудно-частотная характеристика,

$\psi(\omega)$ – фазо-частотная характеристика.

В этом случае выходной сигнал определяется выражением

$$u_{\text{вых}}(t) = 1/2 \int_{-\infty}^{+\infty} \rho(\omega) e^{j[\omega t - \varphi(\omega)] - j\psi(\omega)} d\omega,$$

где $\rho(\omega) e^{j[\omega t - \varphi(\omega)]}$ – спектр выходного сигнала.

Выражение справедливо для любого линейного четырехполюсника независимо от его физического устройства, то есть если две какие-либо системы обладают одинаковыми амплитудными и фазовыми характеристиками, то они одинаково реагируют на прохождение импульса (даже если они построены по совершенно различным схемам и на разных принципах). Это положение дает право при расчетах $\Delta\varphi$, ΔK , $t_{\text{зад}}$ многоканальных СВЧ-усилителей не рассматривать специфические особенности самого усилителя (электронный он или полупроводниковый), а воспользоваться известными АФЧХ усилителей и их разбросом. Также может быть вычислено и групповое время задержки $t_{\text{зад}}$, которое определяется тангенсом угла наклона касательной к фазо-частотной характеристике и зависит от частоты. Для того чтобы спектр входного сигнала без существенных искажений передавался на выход усилителя высокой частоты (УВЧ), должна быть использована симметричная относительно f_p полоса пропускания (определяемая обычно спадом коэффициента усиления на 1–3 дБ), в которой ФЧХ практически допустимо линейна.

Наклон фазо-частотной характеристики для УВЧ на электровакуумных приборах, использующих в качестве замедляющих систем спирали или другие структуры, определяется их электрической длиной l .

Таким образом, $t_{\text{зад}} = \frac{dl}{d\omega}$ – групповое время задержки.

При управлении диапазоном перестройки, например, в электронных узкополосных усилителях обратной волны (УОВ), напряжением u можно получить

$$t_{\text{зад}} = \frac{\frac{dl}{du}}{2\pi \cdot \frac{df}{du}},$$

где $S = \frac{df}{du}$ – крутизна перестройки УВЧ.

Относительный разброс времени задержки, обусловленный разбросом дисперсионных характеристик и крутизна перестройки, составляет

$$\Delta t_{\text{зад}} = \left(\frac{\Delta u}{u} + \frac{\Delta s}{S} \right) \cdot t_{\text{зад}}.$$

Для современных ЭВМ и полупроводниковых приборов разброс группового времени задержки $\Delta t_{\text{зад}}$ находится в пределах долей наносекунды, что обеспечивает соблюдение требований систем компенсации активных помех, идущих по рабочим и компенсационным каналам.

Принципиально важным является вопрос уменьшения искажений АЧХ и ФЧХ для диапазонных СВЧ-приемников из-за включаемых на их входы (для улучшения избирательности) перестраиваемых СВЧ-фильтров. Искажения проявляются за счет излучения сигналов собственной зеркальной частоты СВЧ-смесителя на выход впередистоящего фильтра (или УВЧ) и переотражения от них обратно на смеситель приемника. То есть источником таких искажений является переотражение сигналов собственной зеркальной частоты смесителя от впередистоящего СВЧ-преселектора или СВЧ-усилителя. Для фиксированных рабочих частот путем подбора противофазного расстояния l между диодами балансного смесителя и СВЧ-преселектора или выхода впередистоящего усилителя СВЧ можно получить требуемую форму АФЧХ и максимальную чувствительность СВЧ-приемника. Однако реальная схема СВЧ-приемника с входным перестраиваемым преселектором – фильтром в диапазоне перестройки (10–15 %) – имеет значительную неравномерность АЧХ и ФЧХ, проявляющуюся в виде искажения формы характеристики в полосе пропускания выходного сигнала с ухудшением шумфактора в отдельных участках диапазона. На СВЧ-смесителе чаще возникают паразитные сигналы за счет обратного преобразования рабочего сигнала $f_{\text{пч}}$ и сигналов с частотой $f_{\text{гет}}$, как видно из формулы

$$kf_{\text{пч}} = mf_{\text{зер}} \mp nf_{\text{гет}}.$$

При этом чем больше КСВ выхода впередистоящего преселектора или СВЧ-усилителя, тем сильнее искажение формы их АЧХ, а следовательно, $\Delta\phi$, ΔK между каналами.

Любой радиолокационный или диапазонный приемник должен работать в разрешенном участке частотного диапазона. Особенности обеспечения диапазонной работы многоканального СВЧ-приемника в составе РЛС с ФАР или АФАР обуславливают необходимость проектировки именно

широкополосного приемника, то есть применения схемы с открытым входом. Однако такое построение изначально ухудшает характеристики ЭМС радиолокатора в целом. Кроме того, при подобном построении опасной становится помеха, оказавшаяся на входе радиолокатора в любой точке неотселектированного диапазона, которая может ввести приемник в ограничение. С другой стороны, разработка АФАР с большим количеством приемо-передающих каналов (1 000–25 000) улучшает характеристики динамического диапазона (по сравнению с малоканальным приемником) пропорционально увеличению числа каналов, размещенных на площади раскрытия антенны. Увеличение ДД суммарно-разностных приемных каналов может достигать 30 дБ; подобное изменение необходимо реализовать в аналоговой части многоканального приемника. Однако попадание помехи на зеркальный или внеполосный канал сразу ухудшит чувствительность приемников. Поэтому необходимы увеличение ДД приемника, соблюдение требований помехозащиты РЛС и выполнение международных требований электромагнитной совместимости средств по режекции паразитных сигналов и, в частности, по подавлению зеркальных и внеполосных помех. Перечисленные требования должны быть перенесены на аналоговые приемные каналы, находящиеся после АФАР.

В соответствии с представленными выше теоретическими положениями при разработке СВЧ-приемника необходимо максимально учитывать весь спектр требований к узлам и приемнику в целом.

8. ОПТИМИЗАЦИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ДИАПАЗОННЫХ СВЧ-ПРИЕМНИКОВ МРЛС, УЛУЧШАЮЩАЯ ИХ ЭМС

Диапазонные моноимпульсные РЛС, обладая широким спектром потенциальных и точностных характеристик, наиболее часто применяются в составе локально-территориальных группировок, выполняющих совместные задачи. РЛС подобного типа должны сохранять потенциальные и пеленгационные возможности на протяжении всего периода общих работ. Однако провести всеобъемлющий анализ ЭМС таких РЛС и оценить общую ситуацию практически невозможно.

Необходимо осуществление следующих дискретных исследований:

- исследование ЭМО в заданном локальном территориальном районе;
- исследование и оптимизация требуемых показателей помехозащитности узлов и элементов, функциональных устройств и, соответственно, РЛС;
- проведение расчетов и разработка рекомендаций по условиям работы РЛС в конкретной группе средств.

В настоящей монографии рассмотрены вопросы помехозащищенности и ЭМС СВЧ-приемников, являющихся входными устройствами радиолокаторов. Актуальность рассматриваемых вопросов обусловлена тем, что мешающие сигналы, созданные внутренними и внешними устройствами, уменьшают эффективность работы МРЛС. Поэтому оптимизация элементов, узлов и устройств СВЧ-приемника должна сопровождаться комплексом схемных, схемотехнических, конструктивных и эксплуатационных мероприятий.

В процессе разработки необходимо обратить внимание на помехоопасные узлы устройств, способные ухудшать внутреннюю и межвидовую ЭМС аппаратуры радиолокатора. В табл. 4 перечислены наиболее помехоопасные узлы РЛС.

Таблица 4

Помехоопасные узлы МРЛС

№	Наименование и назначение узла МРЛС
1	Передающая аппаратура, генерирующая, кроме рабочих сигналов, помехоопасные уровни СВЧ-колебаний в широком частотном спектре, начиная с источника опорного (кварцевого) сигнала, схем образования рабочих сигналов и гетеродинов, модулятора и выходного усилителя СВЧ
2	Высокочувствительные приемники, осуществляющие селекцию, усиление, преобразование принятых одновременно с полезными сигналами помеховых воздействий, которые создают комбинационные и другие ложные сигналы
3	Аналоговые, цифровые и другие последующие узлы и цепи с недостаточной экранировкой и большим количеством контрольных связей
4	Межаппаратные порты и порты связей поворотного антенно-приемо-передающего устройства, длинная линия связи, недостаточная экранировка и неоптимальное согласование импедансов
5	Близко расположенные узлы, создающие паразитные электромагнитные эмиссии, особенно вследствие некачественного заземления электрических соединений

В табл. 5 показаны первичные меры, предпринимаемые разработчиком для уменьшения помехоопасности элементов приемника. В [3] представлены некоторые инженерные решения, улучшающие характеристики ЭМС при проектировании электротехнических и электронных изделий.

Первичными мерами обеспечения достаточной помехоустойчивости устройств являются проработка и правильный выбор внутри заданного рабочего диапазона частот зондирующего сигнала f_p , первой и второй промежуточных частот $f_{\text{пр1}}$, $f_{\text{пр2}}$, а также расположение (относительно f_p и $f_{\text{пр1}}$) частот первого и второго гетеродинов, так как из-за этого могут возникать побочные и интермодуляционные каналы приема паразитных сигналов,

ухудшающие характеристики СВЧ-приемника. В процессе разработки необходимо проводить расчетный анализ возможности возникновения паразитных каналов приема, определять требования к отдельным устройствам и модулям, должна осуществляться экспериментальная проверка восприимчивости разрабатываемого СВЧ-приемника к помеховым сигналам в соответствии с действующими стандартами.

Таблица 5

**Первичные меры по уменьшению помехоопасности элементов
и узлов приемников**

№	Меры, направленные на уменьшение помехоопасности
1	Защита элементов схем от накопления статических зарядов
2	Размещение СВЧ – приемной и передающей аппаратуры в экранированных металлических контейнерах
3	Выполнение отдельных СВЧ- и ПЧ-устройств по модульному принципу, обеспечивающему дополнительную экранировку на уровне ячеек, блоков, шкафов
4	Обеспечение однородной поверхности нулевого потенциала схемных элементов на рабочих платах функциональных узлов
5	Предотвращение искажений высокочастотных сигналов в схемах каналов из-за неоднородности трактов
6	Устранение влияния взаимных кондуктивных и магнитно-электрических помех
7	Правильность прокладки жгутов и разводки электропитания в устройствах
8	Выполнение отечественных и необходимых зарубежных требований по помехозащите при проектировании, монтаже и корпусировании схемотехнических узлов
9	Спецтребования в соответствии с назначением изделий

Выполнение всего комплекса необходимых мер обеспечивает работоспособность СВЧ-приемников РЛС в условиях воздействия непреднамеренных, промышленных и атмосферных влияний, а также преднамеренных помех, силового воздействия, ЭМИ и т. п. Проведенные расчеты и исследования позволят разработчикам осуществить рациональное частотно-территориальное размещение МРЛС в заданной локальной группировке.

Возвращаясь непосредственно к оптимизации элементов СВЧ-приемников, направленной на улучшение их помехозащищенности и качества аппаратуры, рассмотрим развернутую аналоговую схему одного из пеленгов ионных каналов моноимпульсной РЛС (рис. 6) поэлементно и проследим возможности улучшения их ЭМС в целом.

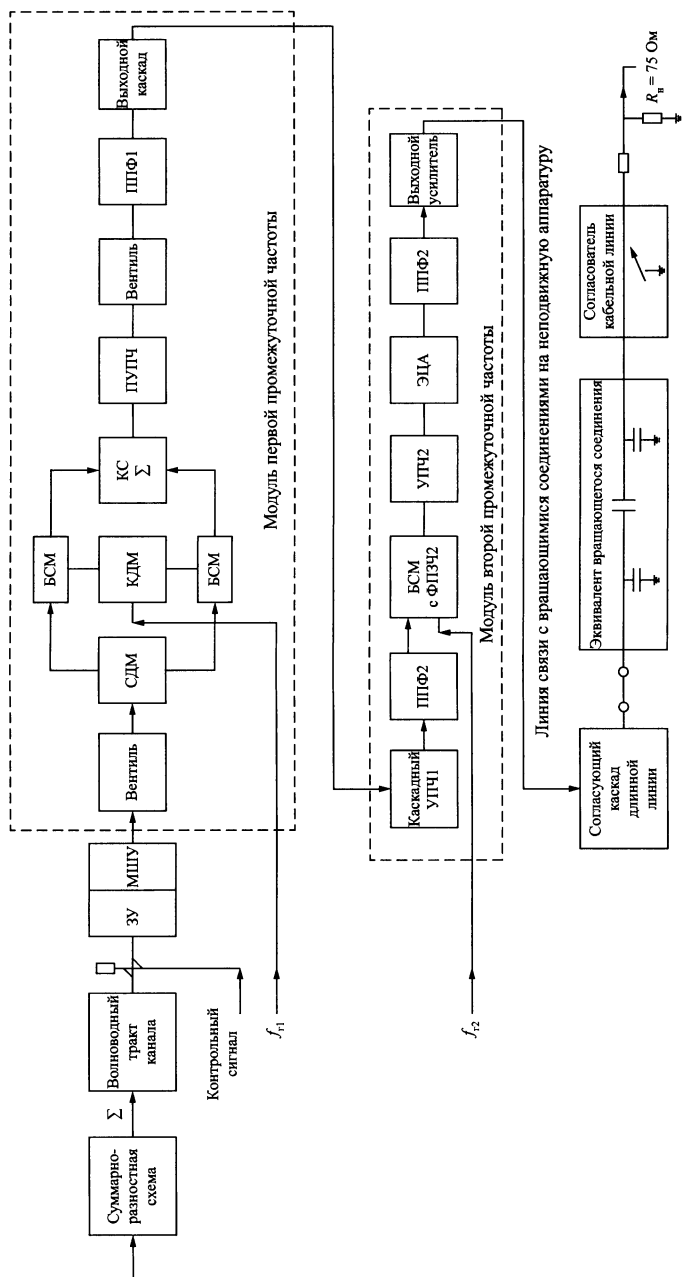


Рис. 6. Развернутая схема пеленгационного канала СВЧ-приемника моноимпульсной МРЛС

В схеме, представленной на рис. 6, использованы следующие обозначения:

ЗУ – защитное устройство;

МШУ – маломощный усилитель;

СДМ – синфазный делитель мощности;

КДМ – квадратурный делитель мощности;

БСМ – балансный смеситель;

КС – квадратурный сумматор;

ПУПЧ – предварительный усилитель промежуточной частоты;

ППФ – полосно-пропускающий фильтр;

ФПЗЧ – фазовое подавление зеркальной частоты;

ЭЦА – электронно-цифровой аттенюатор;

f_{r1}, f_{r2} – сигналы частот первого и второго гетеродинов.

Примем, что каждый элемент схемы приемника проектируется в соответствии с техническим заданием и все элементы выполняются с расчетом на получение основных функциональных характеристик. В контексте данного допущения рассмотрим вопросы, касающиеся улучшения характеристик помехозащищенности и ЭМС.

• Входные волноводные тракты приема и передачи

Входными узлами рабочих каналов СВЧ – моноимпульсного приемника высокопотенциальной МРЛС, как правило, являются волноводные или коаксиальные тракты.

На параметры многоканальных диапазонных СВЧ-приемников и РЛС в целом влияют дисперсионные и фильтровые характеристики входных и гетеродинных трактов. Обычно в качестве линий передачи сигналов от антенны к СВЧ-приемнику выбираются равнодлинные волноводные структуры с нормальной дисперсией. Тогда сигналы, пришедшие на входы каналов, соответствующие суммарной, наклонной и угломестной пеленгациям, не имеют различного запаздывания. Внутренние размеры волноводных структур должны быть оптимальны для разрабатываемого диапазона волн, а тракты согласованы на оптимальное КСВ. В пеленгационных каналах желательно конструктивно выравнивать электрические длины как сигнальных, так и гетеродинных трактов. В общем случае должно сохраняться условие минимальной разности разностей длин сигнальных и гетеродинных каналов пеленгационного приемника, то есть должна обеспечиваться совместимость групповой скорости электромагнитных волн на выходах каналов приемника. В этом случае значительно уменьшится влияние трактов на отклонение нуля пеленгационной характеристики и величину подавления фазовым компенсатором помех с боковых лепестков диаграммы направленности РЛС. Фильтровые характеристики трактов

многоканальных линий передач определяют входную заданную избирательность приема и, соответственно, подавление помех, находящихся вне рабочего диапазона. Величина вносимых потерь влияет на чувствительность всего устройства. Полоса прозрачности трактов должна ограничиваться диапазонами сигнальных и гетеродинных частот. Остальные при необходимости должны отсекается фильтрами верхних и нижних частот. Встроенные в тракты вспомогательные узлы контрольных сигналов, например, направленные ответвители, тройники, переключатели сигналов, влияют на согласование каналов, увеличивая потери в диапазоне частот. Важными элементами, составляющими волноводные тракты, являются конструктивные волноводные разъемы, уголки и т. д. Фланцы волноводных разъемов должны быть плотно совмещены для обеспечения минимального просачивания. Для улучшения данного параметра рекомендуется применение подавляющих канавок. В специализированной литературе для разработчиков представлено достаточное количество специфических элементов с регулируемыми при проектировании характеристиками.

• Защитные устройства

Энергетическая самозащита СВЧ-приемников является основным требованием для всех действующих РЛС вне зависимости от их назначения. Защита входа СВЧ-приемника должна одновременно удовлетворять требованиям по электрической прочности ($P_{\text{пад макс}}$), быстродействию (τ_0), полосе пропускания (Δf), развязке ($P_{\text{разв}}$) и минимально вносимым в периоды приема потерям ($P_{\text{пот}}$). Совмещение всех требований, особенно для высокопотенциальных многоканальных моноимпульсных РЛС, приводит к значительному усложнению ЗУ. Предпочтительными при этом являются циклотронное защитное устройство, представляющее собой электронный прибор, построенный на явлении циклотронного резонанса в электронном потоке, охваченном магнитным полем (рис. 4, глава 9), а также ЭСУ, ЭСКУ.

Новейшие отечественные ЦЗУ по своим параметрам превосходят зарубежные аналоги [8]:

- электрическая прочность – 5–10 кВт (300 Вт средней мощности);
- время восстановления после сильного воздействия < 10 нс;
- шумовая температура прибора равна 200 °К;
- верхняя граница линейности составляет $2 \cdot 10^{-3}$ Вт.

Другие характеристики определены в технической документации изготовителя на соответствующий прибор.

Диапазонное ЗУ, имеющее достаточную полосу прозрачности во время приема, в контексте обеспечения ЭМС должно иметь значительную избирательность вне данной полосы.

Механизм работы ЦЗУ обеспечивает значительное подавление сигналов вне полосы прозрачности (рис. 3, глава 8) за счет ослабления взаимодействия СВЧ-сигнала с циклотронной частотой колебания электронного луча прибора. При полосе прозрачности прибора $\sim 250\text{--}300$ МГц отстройка СВЧ-сигналов на $\geq 1\,000$ МГц обеспечивает их подавление на 60 дБ и более, что дает основание проектировать СВЧ-приемники с высокой первой промежуточной частотой. Таким образом, современные СВЧ-приемники, имеющие в составе ЦЗУ с супергетеродинным преобразованием частоты сигналов на первую высокую промежуточную частоту ($\geq 1\,000$ МГц), делают возможным подавление сигналов зеркальных частот более 60 дБ и обеспечивают подавление всех побочных частот (при введении схем ФПЗЧ) более 80 дБ. Следовательно, внешняя помехоустойчивость СВЧ-приемника в случае применения ЦЗУ, правильно выбранной сетки СВЧ и промежуточных частот резко повышается. Сверхбыстрый переход состояний «закрыто – открыто» (5–10 нс), расширенный динамический диапазон работы и небольшие потери сигнала во время приема определяют уникальность данного вида ЗУ в сравнении с другими устройствами подобного назначения и их широкое применение в моноимпульсных РЛС.

• Малошумящие СВЧ-усилители

Разработка качественного малошумящего усилителя СВЧ – достаточно трудная задача, особенно для современных радиолокационных моноимпульсных систем. Разработанная в России серия электростатических усилителей (ЭСКУ, ЦЗКУ) решила многие проблемы построения канальных СВЧ-приемников. Алгоритм построения СВЧ-приемника моноимпульсной РЛС с учетом свойств малошумящих усилителей для современных РЛС представлен в [8]. Преимущества ЭСУ как электропрочного усилителя с наносекундным временем восстановления предоставляют возможность его применения в СВЧ-приемниках без специального защитного устройства.

Важной особенностью отработки ЭСУ, ЭСКУ является необходимость согласования входа и выхода прибора на минимум КСВ в диапазоне полосы прозрачности. Рассогласование ЭСУ с входным трактом от антенной системы связано как с дополнительными потерями сигнала, так и с рассогласованием ФЧХ каналов в заданном диапазоне частот. КСВ выхода прибора также должен быть ограничен для снижения отражений сигналов основной и зеркальной частот, созданных преобразователем частоты в направлении выхода ЭСУ и вследствие недостаточного согласования направленных обратно в виде ложных добавок к рабочему сигналу.

Важным моментом является наличие низкочастотных шумов в усилителях СВЧ, модулирующих несущую частоту проникающего сигнала или помеху. Указанный процесс резко активизируется при появлении сигналов на входе приемника выше его границы линейности, так как он интенсивно модулируется составляющими низкочастотного шума и, соответственно, расширяет спектр входного сигнала. В полосе приемника РЛС, работающего в доплеровском режиме, могут попасть десятки сильных составляющих импульсных сигналов, промодулированных шумами. Насыщение полосы приемника подобными составляющими сигналов зависит от ее ширины.

В настоящее время в технических данных разработанных усилителей СВЧ нет таких ограничительных параметров. Однако ЭСУ и ЭСКУ, используемые в отечественных разработках, документально обеспечивают допустимую спектральную плотность мощности низкочастотных шумов на частотах, отстающих от несущего проникающего сигнала на 1–150 кГц в пределах минус 125–145 дБ·Вт/Гц при уровнях ограничения его линейности 10^{-4} – 10^{-5} Вт. В процессе разработки СВЧ-приемника выбор между ЭСУ, ЭСКУ и ЦЗУ совместно с предельно малoshумящим транзисторным усилителем должен определяться заданными функциональными требованиями, предъявляемыми к входному МШУ.

Разработанные диапазонные малoshумящие усилители СВЧ на ЭСУ, ЭСКУ обеспечивают достаточно широкую полосу прозрачности 300–400 МГц при затухании сигналов за пределами отстроек далее 800 МГц, более 60 дБ. Оба варианта дают возможность проектировать модули первой промежуточной частоты с высоким номиналом (~1 000 МГц и выше), в результате чего уже на выходе модуля первой высокой ПЧ может быть обеспечено (с учетом ФПЗЧ) подавление первой зеркальной частоты до 70–80 дБ.

• Преобразователи промежуточной частоты

Смеситель, являясь взаимным устройством, канализирует полезную энергию сигналов в оба направления (на выход и вход модуля). Напряжение частоты $f_{\text{пр}} = f_r - f_c$ или $f_{\text{пр}} = f_c - f_r$, появившееся на выходе смесителя, вызывает напряжение сигнала и на входе смесителя $f_c = f_r - f_{\text{пр}}$, которое распространяется по линии «смеситель – выход УВЧ» и, отражаясь от него, вносит дополнительные потери и искажения в проходящий сигнал. В смесителе также присутствует эффект вторичного обратного преобразования, то есть при действии на выходе смесителя напряжения $f_{\text{пр}} = f_r - f_c$ или $f_{\text{пр}} = f_c - f_r$ оно вызовет на входе смесителя зеркальную частоту $f_3 = f_r - f_{\text{пр}}$.

Эти и другие взаимодействия в смесителе являются причинами искажений, появившихся на выходе модуля преобразователя. Существуют

различные методы их подавления. Например, в балансном смесителе диоды разносятся на величину $\lambda/4$ таким образом, что часть мощности, отраженная от рассогласованных смесителей, далее отражается от вперёдистоящего выхода УВЧ, приходит обратно на диоды смесителя в противофазе и компенсируется. Бибалансное исполнение преобразователя посредством схемы электронно-фазового подавления зеркальной частоты позволяет дополнительно подавлять зеркальные каналы на величину до 20 дБ.

• Модули первой и второй промежуточных частот

Обработка следующих за МШУ модулей первой и второй промежуточных частот, представленных в развернутой схеме одного из пеленгационных каналов СВЧ-приемника, не должна ухудшать значения подавлений сигналов на зеркальных, побочных и внеполосных частотах.

В [8] рассмотрены способы улучшения подавления сигналов в модулях первого и второго преобразований на f_{31} и f_{32} . Основные способы, представленные в [8]:

- в модулях первого и второго преобразований применяются монолитные схемы узлов с плотной компоновкой для уменьшения паразитных реактивностей, а также технологически улучшенная экранировка, помехоопасные элементы и соединения развязываются вентилями;
- установленные полосно-пропускающие фильтры (ППФ) формируют требуемые полосы первой и второй промежуточных частот с заданным подавлением сигналов с частотами $f_{31} = f_c \pm 2f_{пч1}$ и $f_{32} = f_{пч1} + 2f_{пч2}$;
- применены схемы фазового подавления зеркальных каналов в составе балансных смесителей и суммирующих гибридных квадратур;
- монолитные балансные смесители объединены с интегрированными усилителями мощности гетеродинов и обеспечивают расширение линейного ДД сигналов.

Перечисленные меры позволяют улучшить помехозащищенность каналов приема.

Результатирующие характеристики подавления паразитных сигналов в каналах СВЧ-приемника:

- суммарное значение подавления сигналов на $f_{31} > 80$ дБ;
- подавление сигналов на $f_{32} > 50$ дБ;
- подавление сигналов $f_{r1} - f_{пч1/2} \geq 60$ дБ;
- подавление сигналов $f_{r1} - f_{пч1/3} \geq 60$ дБ;
- подавление сигналов $2f_{r1} - f_{пч1} \geq 60$ дБ;
- подавление других паразитных сигналов ≥ 80 дБ.

• Линии передачи высокочастотных сигналов

Антенно-приемные устройства РЛС обычно находятся на поворотных платформах. Рассмотрим их.

Вращающиеся соединения (ВС) передачи сигналов являются основной частью линии передачи от СВЧ-приемника к неподвижному посту управления РЛС. Обычно используют ВС на промежуточных частотах.

Первые токосъемники представляли собой конструкции щеточного типа. Однако их применение сократилось в связи со значительными недостатками (большое переходное неравномерное сопротивление при вращении щеточных контактов), характерными преимущественно для высоких частот, и, соответственно, возникновением щеточных электрических шумов. В последних разработках РЛС используются улучшенные конструкции токосъемников с применением скользящих золоченых контактов (Statement of Work for Slip-ring and Rotary Joining Assembly, for Samsung 2007). Однако указанные схемы должны быть оценены в контексте образования дополнительных электрических шумов.

Очевидно, щеточная секция токосъемника ВС при передаче сильного сигнала добавляет к собственному шуму приемника наведенный щетками низкочастотный электрический шум. Амплитуда электрического шума пропорциональна силе тока, протекающего через токосъемник. При наличии сильной помехи или проникшего в приемный тракт РЛС зондирующего сигнала ток со щеточных контактов увеличивается, наведенный шум резко повышается, модулируя помеху или нулевой сигнал, наблюдаемые на выходе приемника.

Если мощность собственного шума на выходе приемника

$$P_{\text{вых}} = kT \cdot \Delta f \cdot F \cdot K_y, \quad u_{\text{ш вых}} = \sqrt{P_{\text{вых}} \cdot R_{\text{н вых}}},$$

то спектральная плотность мощности выходного шума

$$N_{\text{ш}} = u_{\text{ш вых}}^2 / \Delta f,$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана;

Δf – полоса пропускания приемника;

F – коэффициент шума;

K_y – коэффициент усиления.

Когда дополнительный шум ($N_{\text{ш д}}$) наводится за счет мощной помехи, коэффициент энергетических потерь в приемном тракте вследствие появления дополнительного наводящего шума будет составлять $\frac{N_{\text{ш}} + N_{\text{ш д}}}{N_{\text{ш}}}$.

Проверка щеточного аналога ВС показала, что дополнительные шумы при передаче линейных рабочих сигналов совместно с помехой амплитудой 50–70 мВ увеличиваются до 20 дБ в доплеровском диапазоне частот.

Величина помехи 50–70 мВ, проходящей во вращающемся соединении связи пеленгационного канала приемника, соответствует массивным отражениям от близких к РЛС объектов или отражениям, возникшим в результате дуэльных ситуаций с соседними радиолокационными станциями. Таким образом, наведенный шум в щеточных токосъемниках проявляется при входных сигналах, часто превышающих линейный режим работы приемника, то есть в случаях, когда вместе с полезным сигналом принимается интенсивная помеха – отражение выше уровня ДД приемника. Поэтому к РЛС, работающим в доплеровском режиме селекции движущихся целей, при различных видах сигналов, в том числе квазинепрерывных, необходимо предъявлять требования по дополнительному электрическому, модуляционному шуму (при наличии сильного проникающего сигнала), возникающему за счет нестабильных неравномерных контактов трения и искрения при вращении колец токосъемника.

Реальные параметры разрабатываемых щеточных ВС:

- коэффициент передачи $\geq 0,6$;
- сопротивление кольцевых контактов $\leq 0,05$ Ом.

Высокочастотная секция неконтактного (емкостного) типа наиболее приемлема для вращающихся соединений антенных постов с аппаратными кабинами (АК) РЛС.

Конструктивно токосъемник представляет собой набор из кольцевых пластин, причем группа внутренних пластин неподвижна относительно цилиндрических опор, а группа наружных пластин является подвижной относительно данных опор и неподвижна относительно АК.

Внутри каждой группы пластины соединены параллельно. Наружные пластины через высокочастотный разъем соединены с согласующим каскадом на выходе СВЧ-приемника. Группа внутренних пластин соединяется через высокочастотный кабель с согласованным разъемом аппаратного контейнера. Высокочастотные сигналы, поступающие в токосъемник, предварительно проходят через согласующие каскады, предназначенные для компенсации потерь сигнала при переходе через токосъемник, кабельную линию передачи и согласователь в АК. Емкостную секцию токосъемника с достаточной степенью приближения можно представить в виде П-образной эквивалентной схемы, входящей в эквивалентную схему линии передачи ВЧ-сигналов (рис. 7).

Линия передачи представляет собой эквивалентную схему выхода согласующего каскада 1 канала СВЧ-приемника, нагруженного на ВС (эквивалентная схема емкостной секции токосъемника 2) и согласующую нагрузку 3 – R_n . Перед нагрузкой часто устанавливают длинный кабель связи (200 м и более). Эквивалентная схема выхода согласующего каскада имеет источник напряжения U_1 с внутренним сопротивлением R_x

и индуктивность L_k , которая предназначена для компенсации емкостной составляющей сопротивления токосъемника.

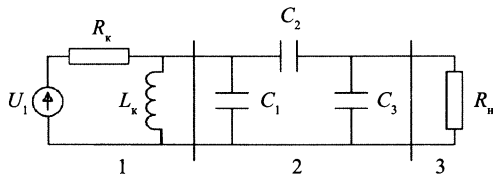


Рис. 7. Эквивалентная схема линии передачи ВЧ-сигналов

Выбор эквивалентной схемы линии передачи дает возможность создания ее математической модели, на которой исследуется влияние разбросов 1, 2, 3 на комплексный коэффициент передачи (амплитуду и фазу) выходных сигналов в аппаратном контейнере кабины в заданной полосе пропускания АЧХ.

Значение индуктивности L_k подбирается таким образом, чтобы максимум АЧХ, а следовательно, и нулевое значение фазы на выходе линии передачи приходились на среднюю заданную частоту АЧХ, равную номиналу $f_{пч}$, при выбранной нагрузке R_n (R_n определяется выбранным соединительным кабелем, $R_n = 50, 75$ Ом). Приемлемые отклонения значений 1, 2, 3 токосъемника не должны приводить к заметному отклонению нуля ФЧХ от средней части АЧХ и, соответственно, к ухудшению коэффициента передачи.

Разработанные линии передачи обеспечивают:

- полосу пропускания ≥ 100 МГц;
- коэффициент передачи $\geq 0,7$.

Для увеличения развязки между неподвижным экраном и вращающейся конструкцией токосъемника целесообразно использовать лабиринтные сочленения. В последнее время значительные усилия проектировщиков МРЛС направлены на разработку многоканальных вращающихся соединений линий передачи на волоконно-оптических линиях связи (ВОЛС).

Межаппаратные и внутриаппаратные связи, проявляющиеся через силовые и разъемные вводы линий и особенно вынесенные кабельные связи длинных кабельных линий, допускают возможность проникновения нежелательных сигналов и множественных полей в связующие устройства, поэтому защита от такого рода аппаратных и промышленных помех осуществляется комплексно, при конструировании и размещении линий на рабочих участках заданных территорий. Наиболее актуальными в настоящее время становятся разработки устройств передачи ВОЛС.

Приведенные выше предложения, последние разработки СВЧ-приемников учитывают действующие ГОСТ, международные стандарты и «Регламент радиосвязи», которые определяют основные требования к ЭМС/ЭМП.

9. ВНЕДРЕНИЕ УСТОЙЧИВЫХ К ПОМЕХАМ УЗЛОВ ПРИЕМНИКА ДИАПАЗОННЫХ МРЛС

Мгновенной полосой пропускания любого приемного элемента является полоса частот, в пределах которой данный элемент может одновременно пропускать или усиливать два сигнала и более, при заданном допуске его коэффициента передачи (по модулю и фазе). Оптимальным вариантом является радиолокационный приемник, имеющий наиболее узкую полосу по высокой частоте, соизмеримую с шириной спектра излучаемого сигнала, увеличенную на допуск его нестабильности, при требуемых частотной и импульсной характеристиках. Допуск на нестабильность должен быть минимальным.

Приемник МРЛС для выполнения комплексных задач должен иметь достаточный диапазон настройки, которую можно производить при помощи элементов электронной или механической подстройки и перестройки без ухудшения требуемых рабочих характеристик. Особенностью построения диапазонных МРЛС, применяющих ФАР или АФАР, является большое количество входных приемных элементов (10 000 и более). Введение в них селективных узлов трудновыполнимо, что заставляет разработчиков проектировать вход СВЧ-приемника широкополосным, допускающим селекцию всего требуемого диапазона рабочих частот. При этом подобное построение изначально ухудшает характеристики каждого отдельно стоящего локатора; особенно опасной является посторонняя помеха, оказавшаяся на его входе в любой точке рабочего диапазона, которая может ввести приемник в ограничение. Однако АФАР с большим количеством элементов предоставляет и определенные преимущества – улучшает характеристику динамического диапазона по сравнению с одноканальным или малоканальным приемником пропорционально числу каналов, расположенных на площади раскрытия антенны. Соответственно, и приемные каналы после АФАР должны иметь увеличенный ДД приема, так как попадание помехи на зеркальный или побочный канал сразу ухудшает чувствительность приемника. Поэтому основные требования ЭМС по режекции паразитных сигналов, в частности по подавлению зеркальных и других паразитных сигналов, должны быть распространены на приемные каналы после АФАР. В связи с тем что эти каналы подвержены мощным

воздействиям собственного передатчика, проникающим с раскрыва антенны, или отражениям от близко расположенных предметов, селективные элементы, устанавливаемые на входах приемников, должны быть достаточно электропрочными. Поэтому в таких случаях обычно используются как пассивные фильтры (преселекторы), так и электропрочные активные элементы, обеспечивающие электронное подавление сигналов нежелательных частот.

Преселекторы СВЧ, в данном случае служащие для предварительной частотной селекции, должны обладать достаточной электропрочностью, минимальными входными потерями в полосе пропускания и высокой частотной избирательностью. В большинстве случаев они выполняются в виде объемных резонаторов (прямоугольных или цилиндрических), полосковых и микрополосковых схем. Объемные резонаторы представляют собой диэлектрическую среду, ограниченную металлической поверхностью. Это металлические или диэлектрические резонаторы, внутренняя поверхность которых обеспечивает выполнение условий полного отражения. При проектировании преселекторов должен выполняться ряд условий. Металлическая стенка резонатора должна иметь хорошую проводимость, чтобы токи, возникшие в нем, не вызывали больших потерь. Среда, заполняющая объем, также не должна обладать потерями. Волноводные преселекторы – объемные резонаторы, обычно применяемые во входных приемных устройствах при заведомо больших уровнях мощности, проникающих от передатчика. Прямоугольные резонаторы проектируются широкополосными, при настройке узкой полосы пропускания они сильно увеличивают потери. Резонаторы подобного типа неудобны в настройке и перестройках. На волноводах стандартного прямоугольного сечения технологически проще выполнить резонаторы фиксированной частоты путем установки в них соответствующих диафрагм. Коаксиальные и полукоаксиальные резонаторы достаточно компактны, имеют меньшие габариты, но обладают сравнительно невысокой добротностью, обычно применяются в длинноволновом участке волновода.

В качестве входных электропрочных высокодобротных узкополосных резонаторов, перестраиваемых в широком диапазоне частот, предпочтительно использовать цилиндрические резонаторы. Они удобны при перестройке в широких пределах и технологичны в изготовлении. Наиболее практичной конструкцией входного диапазонного преселектора для современных МРЛС является цилиндрический резонатор с межтиповой связью, обладающий достаточной электропрочностью, у которого два перпендикулярно поляризованных типа колебаний TE_{\parallel} (H_{\parallel}) связаны между собой, причем один из них имеет связь с входным волноводом, другой – с выходным.

Двухконтурный резонатор с межтиповой связью представлен на рис. 8.

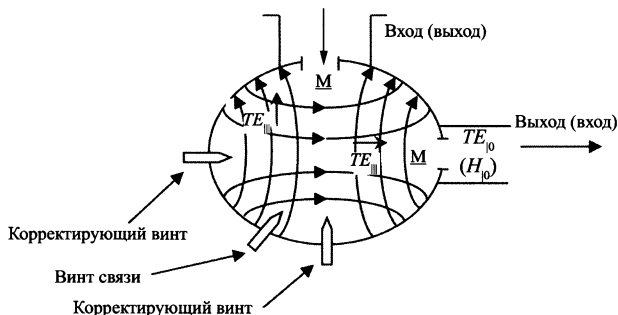


Рис. 8. Двухконтурный резонатор с межтиповой связью

В таком преселекторе входной и выходной прямоугольные волноводы с основным типом колебаний TE_{10} связаны с соответственно поляризованным типом колебаний в цилиндрическом резонаторе TE_{III} через диафрагмы \underline{M} в виде круглых отверстий в середине боковых стенок цилиндра так, что направления их электрических векторов совпадают. Входной и выходной волноводы расположены под углом 90° . При регулировке средним винтом возникает межтиповая связь между перпендикулярно поляризованными колебаниями TE_{III} . Увеличивая регулировочным винтом связь этих перпендикулярных колебаний, можно получить плоскую или двугорбую частотно-полосовую характеристику. Два других корректирующих винта служат для регулировки симметричности характеристики преселектора путем изменения резонансных частот колебаний TE_{III} . Эквивалентная схема двухконтурного резонатора представлена на рис. 9.

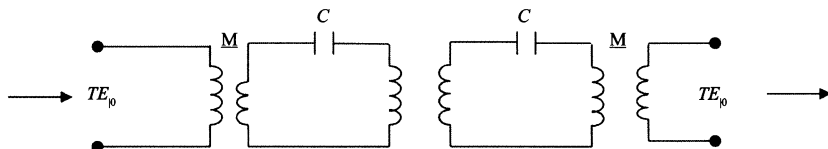


Рис. 9. Эквивалентная схема двухконтурного резонатора

Поршнем, расположенным в торце цилиндрического резонатора, регулирующим его объем, можно изменять резонансную частоту колебаний преселектора в пределах 10–20 % от f_p . Конструкция такого резонатора позволяет избежать нежелательных типов колебаний в пределах рабочего диапазона перестройки (1 000 МГц и выше).

Величина связи преселектора со входом и потребителями выбирается в зависимости от назначения резонатора и предъявляемых к нему требований: чем более широкополосным должен быть фильтр, тем сильнее должна быть связь с внешними цепями, соответственно, больше размеры отверстий связи, что влечет за собой снижение добротности и увеличение потерь.

В резонаторе-преселекторе, кроме основного выбранного типа колебаний, могут возникать колебания других видов, а также колебания за счет вырождения основного типа. Наличие таких колебаний приводит к возникновению ложных резонансов и ухудшению добротности резонатора вследствие дополнительного рассеяния электромагнитной энергии. В цилиндрических преселекторах-резонаторах, наиболее часто используемых во входных устройствах СВЧ-приемника, при попадании на них сильного проникающего сигнала передатчика количество возможных паразитных колебаний с хорошим приближением можно определить эмпирической формулой

$$N = 4,39 \frac{V}{\lambda^2} = 4,39 \frac{\pi D^2 L}{4 \lambda^2},$$

где V – объем резонатора,

$$V = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot L}{4},$$

D, L – размеры резонатора.

Снижения нежелательных колебаний можно достигнуть, располагая внутри резонатора (в поршне за ним) поглощающие резисторные канавки вдоль направления токов, соответствующих этим колебаниям. Поглощение нежелательных колебаний с помощью таких канавок (в случае правильной установки) незначительно сказывается на добротности резонатора. Методы исключения паразитных типов колебаний в резонаторах должны быть индивидуальными в каждом конкретном случае. Входные резонаторы-преселекторы для СВЧ-приемников предпочтительно выполнять из латуни, меди или инвара при повышенных требованиях к термостабильности. Внутренняя поверхность резонатора предварительно полируется, затем покрывается подслоем металла с хорошей электропроводимостью (серебро, золото толщиной 10–20 мк). После покрытия окончательно полируются внутренние поверхности.

Вариантом подавления сигналов на f_{31} при высоком номинале первой промежуточной частоты может быть использование волноводных СВЧ-фильтров высокой частоты или широкополосных полосно-пропускающих фильтров.

В качестве ФВЧ можно использовать и отрезок волновода, являющийся заперделным для сигналов зеркальных частот f_{31} и пропускающий сигналы в рабочем диапазоне частот f_p с небольшими потерями. Например, для устройств в трехсантиметровом диапазоне во входных рабочих волноводах сечением $35 \times 5 \text{ мм}^2$ возможно введение для этих целей отрезка волновода сечением $17 \times 5 \text{ мм}^2$. Критическая длина волны такого волновода $\lambda_{кр} = 34 \text{ мм}$ ($\lambda_{кр} = 8,8 \text{ ГГц}$).

Потери отрезка заперделного волновода длиной l в трехсантиметровом диапазоне можно найти по формуле

$$\alpha_3 = 8,666 \cdot \gamma \cdot l \text{ (дБ)},$$

где γ – постоянная распространения,

$$\gamma = \frac{2}{\lambda_{31}} \cdot \sqrt{\left(\lambda_{31} / \lambda_{кр}\right)^2 - 1}.$$

Для обеспечения ослабления сигналов на высокой зеркальной частоте $\alpha_3 \geq 20 \text{ дБ}$ в отрезке волновода трехсантиметрового диапазона его длина должна составлять

$$l = \frac{\alpha_3}{8,666 \cdot \gamma} \approx 77\text{--}80 \text{ мм}.$$

Согласование сечений основного волновода и заперделного между его входом и выходом достигается установкой ступенчатого или плавного перехода. Такой ФВЧ с использованием отрезка заперделного волновода (для случаев применения высоких промежуточных частот) прост в изготовлении и не требует настройки.

В настоящее время также существуют разработанные и проектируемые ряды селективных элементов, узлов, использующих резонансные явления в диэлектриках с большой диэлектрической проницаемостью, улучшающие частотно-избирательные и энергетические характеристики устройств при сниженных массогабаритных показателях и стоимости.

Различают следующие виды селективных узлов:

- фильтры нижних частот (ФНЧ);
- фильтры верхних частот (ФВЧ);
- полосно-пропускающие фильтры (ППФ);
- полосно-заграждающие фильтры (ПЗФ);
- фильтры гармоник.

Перспективность создания миниатюрных диэлектрических элементов обусловлена тем, что они практически не расходуют энергию на излучение благодаря внутреннему отражению от раздела сред, материалов при

их высокой добротности. Главными недостатками указанных элементов являются температурная нестабильность, то есть необходимость применять термостаты и криостаты, а также дополнительные потери. Существующие разработки электрически перестраиваемых селективных устройств на магнитостатических волнах (МСВ), других диэлектриках и кристаллах также уступают традиционным волноводно-коаксиальным конструкциям по техническим характеристикам, стоимости и т. д.

В данном контексте интерес представляют селективные элементы на паразитных частотах с диэлектрической проницаемостью более 10 000. Однако для МРЛС предпочтительны другие методы формирования входной полосы пропускания СВЧ-приемника и подавления сигналов зеркальных, паразитных частот и внеполосных каналов. Подходящим решением в данном случае может стать, например, разработка совокупных сочетаний селективных свойств электропрочных СВЧ-усилителей типа ЭСУ, ЭСКУ, первого преобразования на высокие промежуточные частоты, а также схем ФПЗЧ на высоких промежуточных частотах.

Так как современные моноимпульсные многофункциональные приемники РЛС по своим структурным схемам работают при воздействии сильных проникающих на их вход сигналов от собственного передатчика и помех от соседних комплексов и от вероятного противника, входные устройства приемника должны быть максимально электрически прочными. Поэтому кроме входных селективных элементов в приемниках применяются входные СВЧ-усилители на базе циклотронных резонансных взаимодействий электронного потока и усиливаемых сигналов, обладающих всей суммой необходимых входных параметров, а именно маломощным усилением сигналов, электропрочностью входа и необходимой селективностью усиливаемых сигналов.

ЭСУ, ЦКУ, ЭСКУ, УОВ, а также использующие аналогичный принцип действия циклотронного резонанса ЭСУ, ЦЗУ могут работать при уровнях входных сигналов 5–10 кВт импульсной мощности (300 Вт) при времени срабатывания менее 15 нс с коэффициентом шума < 3 дБ. Кроме того, такие усилители обеспечивают предварительно сформированную полосу пропускания ($\geq 1\,000$ МГц) и ослабление при отстройках от средней частоты диапазона в 1 000–2 500 МГц, превышающее 50 дБ. Поэтому при применении таких приборов желательно обеспечить высокую промежуточную частоту ($> 1\,000$ МГц). Перечисленные факторы обеспечивают возможность увеличить подавление зеркальных и побочных каналов с помощью применения схем ФПЗЧ [8, 9].

Схема ФПЗЧ получает сигнал с СВЧ-усилителя или защитного устройства на два балансных смесителя через синфазный делитель, а гетеродинный сигнал – через квадратурный делитель со сдвигом 90° на другие

входы балансных смесителей. В результате на выходе одного смесителя преобразованный сигнал рабочей частоты будет сдвинут по фазе на 90° по отношению к другому, а преобразованный сигнал зеркальной частоты на -90° . После сложения в квадратурном сумматоре сигналы на рабочей частоте с одного из выходов сумматора поступают в рабочую схему приемника в фазе, а сигналы зеркальной частоты – в противофазе. В результате сигналы, рассеиваясь, поглощаются в нагрузке второго выхода сумматора.

Таким образом, суммарное подавление сигналов зеркальной частоты совокупностью ЭСКУ + ФПЗЧ может достигать 80 дБ и более.

Проектирование устройств рассматриваемого типа требует тщательной отработки. Полученное в ФПЗЧ подавление в 20 дБ для широкополосных сигналов из-за изменения коэффициентов отражения балансных смесителей является хорошим результатом. Фазовые искажения в СВЧ-делителях и квадратурном сумматоре приводят к девиации сигналов по амплитуде. Этому способствует и включение на выходе преобразователя режекторного фильтра, препятствующего прохождению сигнала и гетеродина в дальнейшую схему.

Примерная схема подавления зеркальной частоты представлена на рис. 10.

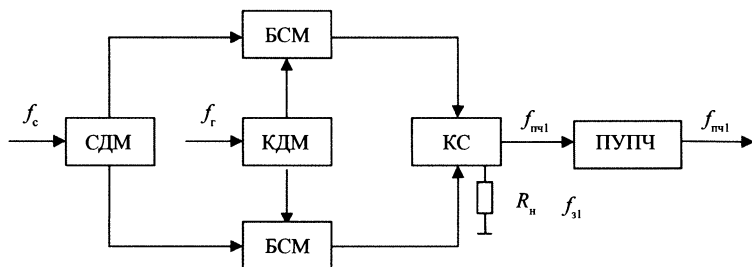


Рис. 10. Схема ФПЗЧ

Применение микрополосковых фильтров обеспечивает требуемую частотную селекцию принятого сигнала. Существует большое количество различных схем ВЧ-фильтров, особенно на микрополосковых линиях (МПЛ), которые представлены в пакетах прикладных программ машинного проектирования. При колебаниях мощности гетеродина более 3 дБ относительно рекомендуемого значения величина преобразования меняется, что увеличивает потери преобразования и, соответственно, коэффициент шума и коэффициент передачи этого узла. Преимуществом является возможность выполнения данной схемы на основе микрополосковых линий.

10. ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ В ЛОКАЛЬНОЙ ГРУППИРОВКЕ СРЕДСТВ. ВЫБОР СЕТКИ РАБОЧИХ, ГЕТЕРОДИННЫХ И ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ЧАСТОТ ДИАПАЗОННЫХ МРЛС

Достаточная помехоустойчивость взаимодействующих средств обеспечивает работоспособность РЛС в условиях различных помеховых воздействий и дает возможность выполнять боевые задачи. Задача МРЛС, в первую очередь антенны и входящего в ее состав приемника, – отсекать полезные сигналы от различных помех по частоте и пространственно-временным характеристикам. В последующих устройствах предусмотрены селекционные методы, оптимизирующие решение поставленной задачи. Например, частотная и фазовая селекция, основанная на различии спектра полезного сигнала и помехи, использование различной частоты сканирования, выделение сигналов доплеровских частот, фильтрация специальных поднесущих и т. д.

Временная селекция основывается преимущественно на различиях импульсного сигнала и помехи по длительности, моменту их появления во времени, а также частоте следования импульсов.

Пространственная селекция выделяет полезный сигнал из смеси с помехами, источники которых не совмещены с ним по пространственным координатам. Селекция реализуется за счет антенны, имеющей достаточно узкую диаграмму направленности и малые лепестки. Применяются методы компенсации и стробирования мешающих сигналов.

Также могут использоваться амплитудная, структурная, функциональная селекции. При этом проще отсеиваются помехи, которые менее интенсивны, чем полезный импульсный сигнал, или не совпадают с ним по времени действия. Структурная селекция основывается на различии структуры помехи и полезного сигнала в целом (по методу кодирования, способу модуляции и т. д.). Кроме того, мерами снижения влияния помеховых воздействий на СВЧ-приемник могут быть фильтрация по входу и вспомогательным цепям, экранирование внутренних устройств, улучшение технологии монтажа и заземлений.

В целом решение проблемы ЭМС и помехоустойчивости взаимодействующих средств осложняется ограниченностью радиочастотного спектра, неравномерностью его использования, увеличением мощностных характеристик передающих устройств, а также несовершенством антенных устройств, повышением чувствительности приемников и расширенным диапазоном излучений помеховых средств. В локальных группировках РЛС ЗУРО, размещенных на ограниченных территориях, могут

быть расположены сотни электронных средств, влияющих друг на друга, присутствуют излучения от космических аппаратов, телевидения, индустриальные помехи от электроэнергетических установок, работающих в зоне действия РЛС, мощные электромагнитные излучения и т. д.

Распределение различных участков спектра радиочастот между функционально независимыми гражданскими радиослужбами осуществляется на основании международного «Регламента радиосвязи» (основной документ, относящийся к распределению радиочастотного ресурса от 10 кГц до 270 ГГц, изданный генеральным секретариатом Международного союза электросвязи (МСЭ) на основе международных отношений). Кроме того, вступил в силу Регламент таможенного союза России, Беларуси, Казахстана, выпустившего более 100 стандартов. Однако взаимодействующие средства, функционирующие в составе локальных группировок, требуют специальных сеток рабочих, гетеродинных и промежуточных частот, учитывающих специфику диапазоновых МРЛС.

Выбор сетки рабочих частот взаимодействующих диапазоновых РЛС требует ограничений, то есть допустимых значений помех, поступающих в приемное устройство через пространство, при условии обеспечения минимума внутренних помеховых флуктуаций. Воздействие помех зависит от мощности источника помех, расстояния R до приемника, его чувствительности, длины волны помехи $\lambda_{\text{пом}}$, параметров среды и ряда других факторов.

В зависимости от места расположения приемной антенны защищаемого устройства относительно источника помех целесообразно разделить пространство на ближнюю и дальнюю зоны. При слишком близких расстояниях между совместно работающими РЛС могут возникнуть взаимные модуляционные излучения. Поэтому при рассмотрении ЭМО средств необходимо уменьшать излучения указанного типа, например, обеспечивая работу антенн МРЛС на разных поляризациях их излучения. Ближние излучения радиопомех могут осуществляться антеннами радиоприемных устройств, корпусами различных конструктивных составляющих РЛС, кабелями (вследствие недостаточного экранирования), элементами монтажных схем, цепями питания и управления.

Пространственный разнос в дальней зоне между РЛС является функцией рабочих частот, выходных мощностей источников помех, усиления антенны, порога чувствительности приемника и т. д.

Кроме того, следует учитывать, что воздействия помех на приемное устройство МРЛС различны в зависимости от структуры, спектрального состава и энергии помехи.

При действии на МРЛС мощной СВЧ-помехи возможны и необратимые повреждения аппаратуры, в первую очередь из-за изменения

структуры полупроводниковых материалов, входных радиоэлементов вплоть до их частичного или полного разрушения. Мощная помеха может существовать в виде одиночного импульса, повторяющейся последовательности импульсов, гармонического или шумового непрерывного процесса. В главе 4 представлены данные об энергии одиночного импульса, приводящего к разрушению различных радиокомпонентов и электронных схем аппаратуры СВЧ-приемника. Энергия одиночного импульса составляет 0,01–1 000 мкДж. При повторяющейся последовательности импульсов или колебаний выход из строя элементов электронных схем происходит при значительно меньшей энергии помех, составляющей единицы процентов от вышеуказанных значений.

Если действующая помеха не вызывает необратимых изменений в цепях рецептора приемника, то при неоднократно действующей интенсивности она может привести к функциональным нарушениям. Проявление реакции радиоэлектронного устройства различно и зависит от мощности помехи. Если она приводит к перегрузке, насыщению активных элементов, то в данном случае существенную роль играют свойства этих элементов, их нештатные характеристики. Поэтому при выборе сетки рабочих частот специальных диапазоновых РЛС необходимо учитывать вышеизложенные условия.

При разработке сетки рабочих и гетеродинных частот диапазоновых РЛС, находящихся в локальных группировках, в первую очередь должны быть учтены:

- многолитерность приема сигналов рабочих частот;
- широкий динамический диапазон работы;
- стабильность АФЧХ приемных каналов при изменении рабочих частот;
- заданная помехозащищенность.

Перечисленные характеристики во многом определяют выбор рабочего участка широкого диапазона. СВЧ-приемник обычно строится с двойным преобразованием частоты. При этом рабочий диапазон должен обеспечить разнос заданного количества рабочих частот РЛС, не влияющих друг на друга во время совместных работ, при необходимых частотных скачках и заданных территориальных расположениях РЛС.

Первая промежуточная частота должна быть максимально высокой. Указанная частота выбирается исходя из условий:

- достаточной отстройки зеркальных частот от любой другой рабочей частоты используемого диапазона;
- удаленности номинала первой промежуточной частоты от международного диапазона телевизионных передающих каналов;

- снижения мешающего действия частотных фокусов в заданном диапазоне работы;
- миниатюризации выполнения микрополосковых или полосковых схем радиоустройств.

Номинал первой промежуточной частоты для обеспечения эффективности подавления рабочих и зеркальных частот должен быть больше разности верхней и нижней частот полосы пропускания любого рабочего СВЧ-поддиапазона РЛС. Дополнительно необходимо контролировать, чтобы условия гетеродинного преобразования соответствовали требованию $2f_{\text{пч1}} \neq n f_c$. Частоты первого гетеродина могут быть расположены как выше, так и ниже частот сигнала (в зависимости от выбора сетки частот взаимодействующих РЛС). В случае выбора частот гетеродина $f_{\text{г1}}$ ниже частот сигнала зеркальные частоты окажутся ниже частот сигнала ($f_{\text{з1}} = f_{\text{сигн}} - 2f_{\text{пч1}}$). При этом рабочие сечения входных волноводов можно выбирать за пределами для зеркальных частот, и с учетом их ослабления, например, СВЧ-усилителем типа ЭСУ, ЭСКУ, ЦЗКУ, они могут быть практически подавлены на величину 60–80 дБ.

При таком выборе желательно иметь вторую зеркальную частоту выше частоты второго гетеродина, то есть $f_{\text{з2}} = f_{\text{пч1}} + 2f_{\text{пч2}}$. Разнос частот первых и вторых гетеродинов разрабатываемой МРЛС должен обеспечить условия для подавления сигналов на опасных частотах как в СВЧ-диапазоне, так и на промежуточных частотах.

Рациональный выбор промежуточных частот приемника должен сократить появление так называемых частотных фокусов f_ϕ , то есть присутствие в спектре выходного сигнала ПЧ, кроме продуктов линейного преобразования радиосигналов, продуктов нелинейного преобразования по основному и соседним каналам приема, появляющихся из-за технического несовершенства функциональных элементов гетеродинных и входных устройств.

При совпадении несущей частоты принимаемого сигнала f_c с f_ϕ происходят образование и совмещение новых несущих радиосигналов. Вследствие различных линейных и нелинейных преобразований формируются спектры высших гармоник принимаемого сигнала, расширенные в число раз, равное номерам гармоник. При $f_{\text{пч}} = \text{const}$ в промежутке изменяющихся значений несущей частоты радиосигнала $f_{ci} \in [f_c^{\text{н}} - f_c^{\text{в}}]$, где $f_c^{\text{н}}$, $f_c^{\text{в}}$ – границы заданного частотного диапазона, могут образовываться несколько вышеуказанных частотных фокусов, зависимость которых определяется уравнением

$$|m\lambda_\phi \pm n| = |\lambda_\phi \pm n_{\text{раб}}|,$$

где $\lambda_\phi = f_\phi / f_{\text{гет}}$ – нормированное значение частоты фокуса;

$n_{\text{раб}}$ – рабочая гармоника гетеродина;

n – первая и вторая гармоники гетеродина.

При целочисленных значениях коэффициентов m , n , $n_{\text{раб}}$ решение уравнения образует множество $\lambda_{\text{фс}} \dots \lambda_{\text{фн}} \dots \lambda_{\text{фм}}$, которое можно ограничить конечными значениями коэффициентов m , n и $n_{\text{раб}}$. Пересечение данного множества значений частот гармоник гетеродина со значениями частот настройки определяют значения учитываемых частотных фокусов.

В инженерной практике при выборе нужной $f_{\text{пр}}$ используют специальные номограммы, представляющие собой геометрическую интерпретацию решений вышеуказанного уравнения. В результате устанавливаются значения частот фокусов и виды комбинационных колебаний, спектры которых попадают в полосу УПЧ. Обычно комбинационными колебаниями высоких порядков пренебрегают. Обобщив представленные выше теоретические положения, можно прийти к выводу, что промежуточную частоту $f_{\text{пр}}$ необходимо выбирать, руководствуясь прежде всего рекомендациями нормативно-технической документации, устанавливающими регламентированные значения указанной частоты и минимум частотных фокусов в заданном частотном диапазоне. В других случаях следует выбирать $f_{\text{пр}}$ таким образом, чтобы в заданном рабочем частотном диапазоне входного приемника не возникали потенциально неприемлемые частотные фокусы.

При этом следует обязательно руководствоваться необходимыми условиями гетеродинного преобразования

$$2f_c \neq nf_r, 2f_{\text{пч}} \neq nf_r.$$

Выполнение условий при выборе сетки рабочих, гетеродинных и промежуточных частот МРЛС обеспечивает возможности построения локальных группировок МРЛС, которые должны находиться в зонах, отнесенных от промышленных объектов на такие расстояния, при которых внешние индустриальные и непреднамеренные помехи не оказывают значительно влияния на их работу.

Допустимое взаимное воздействие МРЛС в составе локальных группировок определяется согласованными частотно-территориальными размещениями, полученными в результате расчетов различных видов влияния и последующих испытаний. При этом заказчик определяет и согласовывает с исполнителем параметры внешней угрожающей электромагнитной обстановки, в которой МРЛС должны демонстрировать соответствие требованиям своей защищенности.

Анализ, оценка и расчеты ЭМС двух и более МРЛС производятся с целью обеспечения их частотно-территориального размещения, при котором исключается неприемлемое взаимное влияние. Возможность обеспечения

ЭМС МРЛС на местности зависит от характера нежелательных излучений передатчиков и путей их попадания в приемные тракты рассматриваемых МРЛС.

Помеховые составляющие, возникающие в передающих устройствах МРЛС, условно делятся на основные и неосновные (побочные и внеполосные) излучения. Основные и неосновные помехи излучаются соседними станциями, находящимися в зоне прямой видимости, действуют на основные, побочные и интермодуляционные каналы приема других станций, а также могут блокировать приемник интенсивной помехой вплоть до выхода из строя СВЧ – входных элементов. Основные и неосновные излучения, а также излучения на гармониках представляют опасность для взаимодействующих средств в локальном пространстве.

При частотно-территориальных размещениях МРЛС достаточным для ряда случаев допущением является некоторое превышение помехи над уровнем шумовой чувствительности приемника МРЛС. При этом учитывается, что в некоторых случаях тракт обработки приемника ослабляет помеху различной структуры сильнее, чем селективность входного приемного устройства, так как сжатие рабочего сигнала и помехи в тракте обработки проходит по-разному.

В случаях напряженной работы в локальной группировке различных по назначению средств с разной структурой сигналов разрешается использовать как критерий защитное соотношение «сигнал/шум», то есть допускается применять соотношение «сигнал/шум» для каждого вида обработки поступающих от воздействующих РТС сигналов.

Допустимость применения перечисленных положений, оптимизирующих локальную работу МРЛС, проверена в ряде разработок. Например, в представленной на рис. 1 (глава 5) схеме диапазонного антенно-приемо-передающего поста многоканальной моноимпульсной РЛС, работающего в составе других средств и передающего точные данные положения не только целей, но и ответчиков наводимых на них ракет и другую необходимую информацию в неподвижную аппаратно-управляющую кабину.

Семиканальный аналоговый СВЧ-приемник МРЛС имеет в своем составе три идентичных канала (суммарный Σ , угломестный $\Delta\alpha$, азимутальный $\Delta\epsilon$), используемых для обнаружения после селекции и сопровождения целей, четыре компенсационных канала для компенсации активных шумовых помех, в том числе воздействующих на РЛС по боковым лепесткам диаграммы направленности антенны, а также для приема сигналов стартовых ракет.

Вырабатываемые возбудителем передатчика быстроменяющиеся частоты первого гетеродина совместно с частотой передатчика, а также сигналы второго гетеродина когерентны между собой, так как исходят от

одного источника. Это, соответственно, создает когерентность стабильных выходных сигналов промежуточных частот СВЧ-приемника, в том числе при смене рабочих частот РЛС. Селекционная, частотная чистка поступивших сигналов производится на СВЧ и первой ПЧ, а компенсация активных помех в пределах частотной полосы зондирующего импульса и некогерентных сигналов осуществляется на второй промежуточной частоте. Сигналы каналов Σ , $\Delta\alpha$, $\Delta\epsilon$ с подавленными помехами поступают через согласующие каскады и вращающееся сочленение в аппаратный пост. Управление работой СВЧ-приемника осуществляется цифровым блоком управления (ЦБУ) через устройство обмена информацией.

Активные разработки РЛС с АФАР предоставляют новые потенциальные преимущества и тактические возможности. Для радиолокационных систем разного назначения структура и построение единичных каналов приема-передачи на полотне АФАР могут быть различными. Однако построение суммарно-разностных пеленгационных каналов аналогового СВЧ-приемника может быть унифицировано для условий работы других моноимпульсных систем, в том числе радиолокационных, работающих с ФАР. Проектирование должно осуществляться с учетом особенностей характеристик диапазонных моноимпульсных РЛС.

11. ПРАКТИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ ЭМС/ЭМП ПРИЕМНИКОВ МРЛС С УЧЕТОМ ИМЕЮЩИХСЯ ПОМЕХООПАСНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Пеленгационные и другие каналы СВЧ-приемника МРЛС имеют наиболее чувствительные и, как следствие, помехоопасные элементы. При разработке данных устройств, помимо стандартной экранировки, заземлений и т. д., должны приниматься особые меры, направленные на минимизацию электромагнитных помех, влияющих на работу МРЛС в целом. Например, при некорректном выборе частот зондирующего сигнала f_p , первой и второй промежуточных частот $f_{пч1}$, $f_{пч2}$, а также при установке расположения частот первого и второго гетеродинов могут возникать побочные, интермодуляционные и другие внеполосные каналы приема паразитных сигналов, а также частотные фокусы, существенно ухудшающие характеристики СВЧ-приемника и РЛС в целом. Причины частотных фокусов рассмотрены выше. Перечисленные факторы прямо определяют их. Частотные фокусы зависят от ЭМО, в которой предполагается эксплуатация разрабатываемой РЛС, от помех, попадающих в антенну через пространство. При разработке СВЧ-приемника МРЛС, типовой функциональный состав которого показан на рис. 11, обязательно проводится

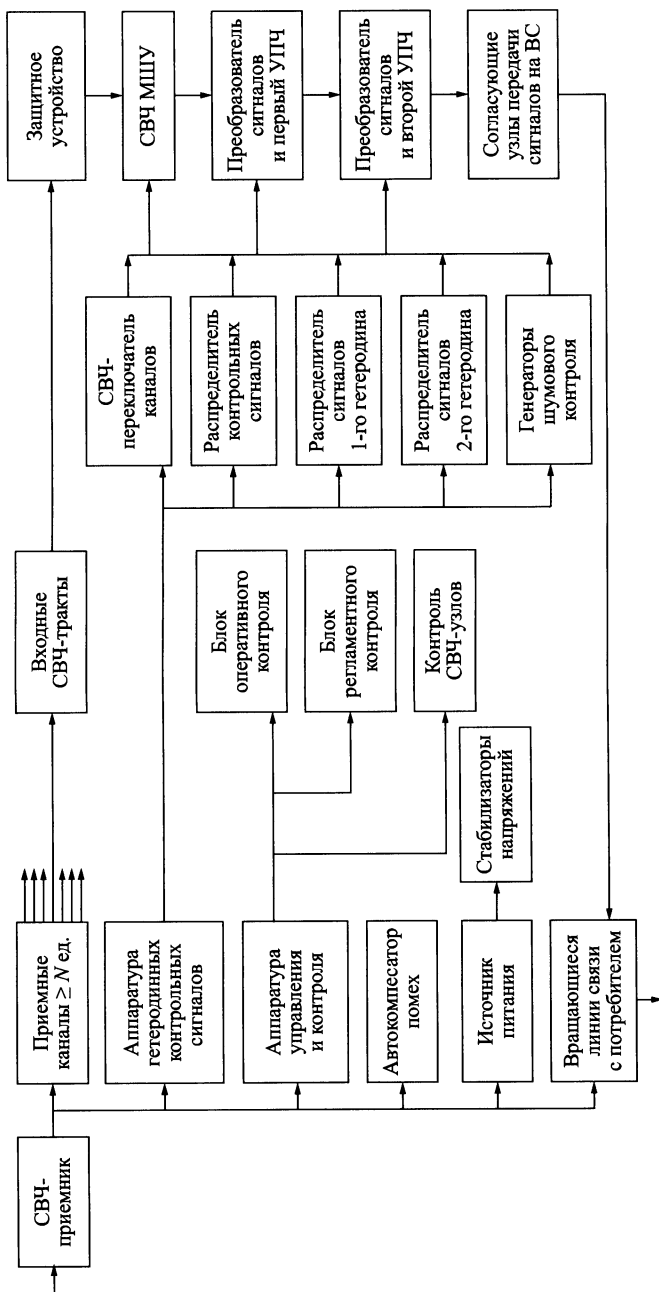


Рис. 11. Типовой состав СВЧ-приемника МРЛС

общий анализ возможности возникновения паразитных каналов приема, определяются требования к отдельным устройствам и модулям с осуществлением экспериментальной проверки восприимчивости СВЧ-приемника к помеховым сигналам в соответствии с действующими стандартами. При этом возникает вопрос обеспечения требований ЭМС/ЭМП при влиянии помеховых элементов.

При отработке аппаратуры в первую очередь определяются инженерно необходимые комплексные требования:

- помехоустойчивость каналов приема;
- частотная избирательность;
- ограничение образования частотных фокусов и другой помехоэмиссии.

Можно выделить четыре основных вида помеховых воздействий, подлежащих обязательным экспериментальным проверкам в процессе разработки и изготовления аппаратуры:

- блокирование СВЧ-приемника, под которым подразумевается уменьшение амплитуды рабочего сигнала под влиянием мощных помеховых сигналов или воздействий, находящихся за границей рабочей частоты;
- возникновение побочных внеполосных каналов приема;
- возникновение интермодуляционных каналов;
- помехоэмиссия, проявляющаяся в рабочих диапазонах частот с дефектных элементов, за счет подвозбуждения, образования частотных фокусов или других явлений.

Могут быть введены и другие специализированные требования.

Проверка реакции СВЧ-приемника на воздействие указанных факторов, как правило, проводится по его частотной избирательности. Схематически график проверки частотной восприимчивости $D(f)$ показан на рис. 12.

На рис. 12 приняты следующие обозначения:

f_p – рабочая частота сигнала;
 $f_p - \Delta f; f_p + \Delta f$ – неконтролируемая полоса избирательности СВЧ-приемника, согласованная с заказчиком;

D_0 [дБ/Вт] – уровень сигнальной чувствительности на рабочей частоте f_p ;

D_1 – уровень восприимчивости сигналов, соответствующий началу блокирования;

D_2 – уровень восприимчивости сигналов, соответствующий началу действия побочных сигналов;

D_3 – уровень восприимчивости сигналов по интермодуляции;

D_4 – уровень восприимчивости сигналов, соответствующих краям полосы пропускания по уровню дополнительных потерь в 3 дБ;

f_{\min}, f_{\max} – частотный диапазон измерений, согласованный с заказчиком, подлежащий контролю, кроме областей $f_p \pm \Delta f$.

Измерение ЭМС характеристик проводится в областях от f_{\min} до $f_p - \Delta f$ и от $f_p + \Delta f$ до f_{\max} .

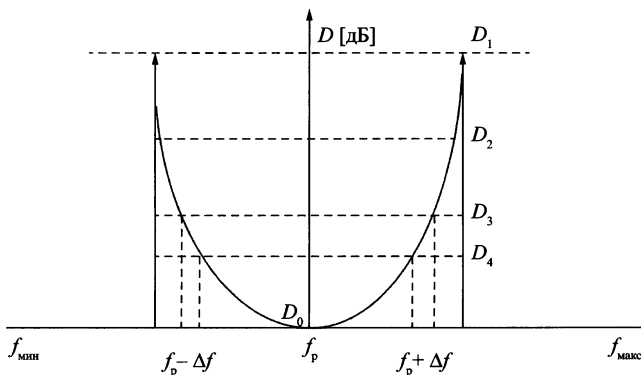


Рис. 12. Схематический график частотной восприимчивости приемника

В соответствии со стандартами f_{\min} определяется для средств с волноводными трактами, критической частотой применяемого волновода, а f_{\max} равна $3f_p$.

Рассмотрим четыре основных вида помеховых воздействий на СВЧ-приемник, подлежащих обязательной проверке.

• Блокирование рабочего сигнала

При эффекте блокирования, то есть при появлении помехи на границах рабочей полосы приемника с уровнем D_1 (дБ), происходит отклонение коэффициента передачи приемных рабочих сигналов от линейной зависимости. Принято считать это отклонение допустимым, если оно не превышает 3 дБ.

Эффект блокирования фиксируется как изменение уровня рабочего сигнала D при действии радиопомехи, частота которой может находиться в диапазонах от f_{\min} до $f_p - \Delta f$ и от $f_p + \Delta f$ до f_{\max} .

Под воздействием более мощной (по сравнению с вызывающей эффект блокирования D_1) помехи могут произойти нарушение электрической прочности и выход из строя СВЧ – приемных устройств.

Методы контроля эффекта блокирования представлены в главе 14.

• Побочные каналы приема

Побочные каналы приема (определяемые уровнем D_2 (дБ)) наиболее активно возникают в первом смесителе СВЧ-приемника и определяются недостаточной избирательностью трактов, предшествующих смесителю, а также нелинейными процессами взаимодействия мешающих сигналов с сигналами и гармониками гетеродинов входных приемных устройств с зависимостью

$$p \cdot f_n \pm q \cdot f_r = f_{\text{пч1}},$$

где p, q – целые числа;

f_n – частоты побочного канала приема;

f_r – частоты первого гетеродина;

$f_{\text{пч1}}$ – первая промежуточная частота приемника.

• Интермодуляционные каналы приема

Интермодуляционные каналы приемного устройства (определяемые уровнем D_3 (дБ)) образуются вследствие взаимодействия нескольких мешающих сигналов и их гармоник с сигналом гетеродина и его гармониками:

$$n_1 \cdot f_{n1} + n_2 \cdot f_{n2} + n_3 \cdot f_{n3} + \dots n_n f_r = f_1,$$

где $n_1, n_2 \dots n_n$ – целые числа ($0, \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots$).

Мешающие сигналы достаточно большого уровня могут создать интермодуляционные каналы на рабочей частоте f_p , например, при

$$2f_{n1} - f_{n2} = f_p,$$

$$3f_{n1} - 2f_{n2} = f_p \text{ и т. д.}$$

При необходимости проводятся работы по устранению появившихся частотных фокусов.

Проверка восприимчивости СВЧ-приемника по интермодуляционным каналам приема представлена в главе 14.

12. КРИТИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ ПРИ РАЗРАБОТКЕ АППАРАТУРЫ

При проектировании аппаратуры МРЛС для выполнения требований по обеспечению ЭМС/ЭМП устройств, блоков и отдельных узлов разработка ведется в рамках нескольких наиболее критических направлений.

Определение критических точек

Критической точкой или областью считается часть любого узла устройства, наиболее восприимчивая к электромагнитным помехам

или создающая помеху. По возможности такие точки определяют на стадии проектно-конструкторских работ до проведения комплексных испытаний.

Общие требования к беспомеховой работе

Технические требования к элементам и узлам с точки зрения ЭМС должны быть согласованы с требованиями, предъявляемыми к системе в целом. Необходимо также предусмотреть возможное влияние ЭМП от контрольно-измерительных приборов. Работа, обеспечивающая заданные характеристики по ЭМС/ЭМП, предусматривает реализацию ряда основных общих направлений.

1. Заземление

Заземление в устройствах является наиболее важным компонентом в контексте обеспечения ЭМС. Необходимо предусмотреть единообразие схем заземления блоков, узлов, шкафов и т. д. Заземление во всех устройствах должно соответствовать предъявляемым техническим требованиям. Схема заземлений в системе должна быть представлена как составная часть проектно-конструкторской документации.

2. Экранирование

Под экранированием понимается ряд конструктивных приемов, обеспечивающих минимизацию влияния излучающих элементов цепей на потенциальную восприимчивость к помехам элементов.

3. Переходные процессы

Особое внимание уделяется проектированию узлов, в которых возможны нестационарные процессы, особенно цепей, предназначенных для обработки цифровых импульсных последовательностей, индуктивных элементов, узлов и т. д. Обычно нестационарные процессы подавляются гасящими цепями. Контактторы, переключатели и другие управляющие элементы выбираются из числа создающих минимальную электромагнитную эмиссию, внешние по отношению к ним цепи защищаются фильтрами.

4. Цепи электропитания

Каждая электрическая цепь, подключаемая к распределительной сети первичного питания, изолируется от корпуса. Источники питания отдельных узлов следует размещать в экранированных секциях этих же узлов. Если кабельный монтаж полностью исключен, минимальное сопротивление изоляции по постоянному току должно составлять не менее 1 МОм.

5. Соединения

Для проектирования любых электрических цепей и соединений в аппаратуре МРЛС должны быть предусмотрены:

- защита от накопления статического заряда;
- обеспечение однородной и стабильной поверхности нулевого потенциала для схем;
- обеспечение обратного провода для тока пробоя;
- предотвращение искажений высокочастотных сигналов в элементах электронного оборудования.

Конструкция аппаратуры должна представлять малое сопротивление для высокочастотных токов. Все элементы конструкции должны быть электрически связаны.

6. Кабельный монтаж

В монтажной кабельной сети должна быть сведена к минимуму возможность появления помех, обусловленных паразитной связью, что определяется длиной кабелей, экранированием различных цепей и разнесом проводов разных классов, заземлением экранирующих оболочек кабелей, скручиванием прямого и обратного проводов излучающих участков цепи.

7. Штепсельные разъемы и соединители

При монтаже соединителей и разъемов необходимо обеспечить проводящую поверхность для надежного контакта по всему периметру (360°), максимальное значение сопротивления постоянному току между корпусом разъема и шасси не должно превышать ~ 10 МОм.

Недопустимо совмещение в одном соединителе силовых и монтажных цепей. При проведении вышеуказанных работ характеристики элементов приемника и его узлов не должны ухудшаться при подаче в них испытательных сигналов.

Многофункциональные СВЧ-приемники не должны ухудшать характеристики каналов МРЛС, включающие в себя их устойчивость к следующим воздействиям:

- электростатическим разрядам в устройствах;
- электромиграции энергии электростатического разряда (ЭСР);
- радиочастотному электромагнитному полю, поступающему от передающих и высокопотенциальных устройств;
- местному повышению температуры на СВЧ-элементах за счет ЭСР;
- электромагнитным излучениям, в том числе большой мощности;
- кондуктивными помехам, наведенным радиочастотными электромагнитными полями;

- магнитным полям, в том числе промышленной частоты, импульсным и незатухающим колебательным магнитным полям;
- динамическим изменениям и колебаниям напряжения электропитания;
- колебательным затухающим помехам;
- кондуктивным помехам, представляющим собой общие несимметричные напряжения;
- пульсациям напряжения электрического постоянного тока;
- изменениям частоты питающего напряжения;
- другим воздействиям, в частности от внешних заземлений, грозовых разрядов, окружающей ЭМО и т. д.

Наиболее опасными для МРЛС являются воздействия на СВЧ-приемник ЭМИ, электростатических разрядов, контактных помех и т. п. Подробнее рассмотрим перечисленные виды воздействий. Испытания по ним проводятся по согласованному с заказчиком техническому заданию и в соответствии с действующей системой российских стандартов.

13. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ИЗЛУЧЕНИЯ БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ И ДРУГИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА СВЧ-ПРИЕМНИК

Проблема влияния мощного электромагнитного импульса на радиоэлектронную аппаратуру стала особенно актуальной при проведении первых ядерных испытаний, во время которых участились выходы из строя радиотехнической и радиоэлектронной аппаратуры.

Традиционно основной задачей разработчика является сохранение работоспособности аппаратуры при воздействии мощных электромагнитных полей и после подобных воздействий. Электромагнитные излучения (искусственного и естественного происхождения) могут вызвать нарушение функционирования широкого класса радиолокационных, космических систем, систем связи, электронно-вычислительной техники и т. п. Наиболее распространенным естественным источником мощного электромагнитного излучения являются грозовые разряды. Мощный искусственный источник электромагнитного излучения – ядерный взрыв, создающий электромагнитный импульс. Излучения мощных радиопередающих средств, радиолокационных станций также могут препятствовать корректной работе МРЛС.

Влияния мощных электромагнитных излучений на радиоэлектронную аппаратуру и способы защиты от них многообразны. Основным проявлением действия электромагнитных излучений на радиоэлектронную аппаратуру является образование наведенных токов и напряжений во всех видах

проводящих схемных компонентов узлов, входящих в МРЛС. Проводящие узлы играют роль коллекторов опасной энергии электромагнитных излучений и суммируют ее в определенной точке таким образом, что она становится разрушающей. Как правило, внутри аппаратуры энергия электромагнитного импульса передается через индуктивную и емкостную связи радиотехнических узлов. В качестве проводников могут выступать антенны, фидеры, проводные и кабельные линии, экранирующие и заземляющие конструкции и т. п. Сильное влияние электромагнитных излучений осуществляется также за счет воздействия на кабели и соединения, выходящие за пределы экранированной аппаратуры. Подобные воздействия на аппаратуру и появление в ее элементах, ячейках, блоках наведенных кратковременных электромагнитных полей или наведенных напряжений и токов не имеют определенного критерия, так как нет однозначных средств защиты аппаратуры. Различные способы улучшения стойкости аппаратуры к электромагнитным излучениям изложены в [16].

По данным [16], современные передающие устройства действующих радиотехнических средств могут создавать:

- напряженность электромагнитного поля до 2000 В/м;
- мощности до 5000 Вт/м² на частотах от 300 МГц до 40 ГГц.

Проблемы электромагнитных излучений актуальны и требуют детального изучения.

Реализуемая на практике защита МРЛС от электромагнитных излучений, как правило, заключается в установке некоторых барьеров (экранов) между источником и рецептором помех. Барьеры строятся в виде фильтров, устройств развязки, ограничителей помех, разрядных устройств и т. п. В России и за рубежом имеется ряд публикаций, государственных отраслевых стандартов и руководящих материалов по требованиям устойчивости к ЭМИ электронных средств [16].

Электростатические разряды в узлах радиотехнических устройств

Разновидностью действующих на приемник МРЛС помех повышенной мощности являются внутренние ЭСР.

Проблема ЭСР актуальна, так как более 30 % выходов из строя узлов электронной техники приходится на действия различных разрядов статического электричества, в том числе и после ЭМИ.

Статическое электричество в повседневной жизни возникает в результате накопления электрических зарядов в диэлектрике и изолированном металле. Процесс возникновения и накопления электрических зарядов в веществах называется статической электризацией. Образующиеся в результате электризации заряды на контактирующих или трущихся элементах,

если эти элементы являются проводящими и заземлены, быстро стекают на землю. Однако на диэлектриках и других полупроводящих материалах, в том числе теле человека, данные разряды могут удерживаться длительное время. Накопление статического электричества в материале или теле человека при достижении определенного критического уровня приводит к электрическому разряду на землю. При разряде импульс разрядного тока создает электромагнитное поле, генерирующее носители заряда в цепях оборудования. Если энергия разряда достаточна, она может вывести из строя элементную базу устройства или оборудования. Отметим, что электростатический заряд мощностью 3 500 В слабо ощутим для пальцев рук человека, при быстром разряде приводит к некоторым последствиям:

- разрушению диэлектриков в элементах устройств;
- разрыву металлизации в соединителях полупроводников;
- короткому замыканию коммутационной металлизации;
- ухудшению параметров собственно полупроводниковых приборов;
- другим повреждениям полупроводниковых приборов и устройств.

Данный факт объясняется тем, что энергия, выделяющаяся при разрядах, например, между человеком и электронной системой, концентрируется в основном около компонентов схемы, мест пайки элементов, вблизи земляных контактов, разрушая их.

В табл. 6 представлены значения предельно допустимого напряжения для полупроводников различных типов.

Таблица 6

**Предельно допустимое электростатическое напряжение
для различных изделий электронной техники (ИЭТ)**

Тип полупроводника	Напряжение, В
Полевые линейные транзисторы	800–4 000
Диоды Шотки	300–2 500
Интегральные схемы	1 000–2 500
Транзисторы	380–7 000
Тиристоры	680–2 500
Пленочные резисторы	300–3 000
СБИС	1 000–3 000
Логические схемы	250–3 000
Пленочные резисторы (мощные)	1 000–5 000
Электрически программируемая память	100
Кристаллы микропроцессора	10

Электростатические разряды оказывают прямое воздействие на электронную аппаратуру, а также являются источниками электромагнитных помех и могут ухудшать ЭМС близко расположенных устройств.

Энергия ЭСР попадает в радиотехнические устройства посредством паразитных связей по магнитному полю или емкостных связей по электрическому полю. Такие ЭМП обычно не вызывают прямого повреждения электронных устройств, но могут приводить к сбоям и нарушению их функционирования. Наибольшее влияние данных ЭМП приходится на диапазоны 10–600 МГц, то есть на аппаратуру РЛС в части УПЧ1, УПЧ2 СВЧ-приемников и аппаратурной кабины. Основной мерой уменьшения воздействия ЭСР в части ЭМП является отделение нежелательных токов помех, возникающих в аппаратуре, от рабочих токов и напряжений. Это достигается экранированием, разнесением цепей, заземлением и фильтрацией. Перечисленные меры, создавая изоляцию, препятствующую проникновению ЭСР, предотвращают возможность выхода из строя аппаратуры (как отдельных элементов, так и целых фрагментов схем).

Основные требования по ЭСР при конструировании аппаратуры СВЧ-приемников:

- рациональная компоновка элементов внутри СВЧ-модулей;
- качественное заземление и экранировка;
- выбор подходящих материалов и покрытий;
- устранение критических точек.

Разрабатываемые СВЧ-модули приемников проверяются на устойчивость к воздействию электростатических разрядов в соответствии с ГОСТ 513.17.4.2-99 г.

• Условия и меры защиты от инъекции электрических и электростатических разрядов

Для защиты от возникающих в процессе эксплуатации электрических разрядов в элементах и узлах приемника применяются схемы, при которых низкочастотные токи разрядов шунтируются на землю через цепи питания и заземления, что дает значительное ослабление влияния ЭМП, в том числе и от ЭСР.

Решение проблемы снижения инъекции возникающих электрических разрядов заключается в установке специальных изолирующих или проводящих экранов. В первом случае это фактически предотвращает разряд до тех пор, пока не пробьется сам экран. В случае применения экранов из металла при разряде заряды будут инжектироваться не в компоненты защищаемой схемы, а в хорошо заземленный экран. Заземление отведет заряд с экрана, снизит электростатическое поле заряда и предотвратит дальнейшую инъекцию заряда в элементы схемы узла.

• Местное повышение температуры при разрядах ЭСР

В результате электростатического воздействия на компоненты аппаратуры может проявляться их местный разогрев в результате джоулева тепловыделения. Местные повреждения, в частности полупроводниковых приборов, укрепляют дополнительной защитой, например, улучшением отвода тепла с критических точек.

• Помехи, вызываемые изменением контактов в радиоцепях

Контактные радиопомехи в приемнике вызваны переизлучениями электромагнитных волн, излучениями соседних мощных устройств, в том числе передающих.

МРЛС всегда имеет подвижные устройства, например, антенно-приемо-передающие посты, вращающиеся линии передачи высокочастотных сигналов и т.п. Переизлучение электромагнитных волн обусловлено переменными во времени сопротивлениями между проводящими контактами физически соединенных схем, находящихся в полях действия этих устройств. Указанное явление характерно для радиосредств, размещаемых на подвижных объектах (самолеты, корабли и т.д.). Подобные объекты содержат большое количество соединенных между собой металлических элементов, образующих систему контактов, некоторые из которых при движении объекта оказываются переменными и составляют систему переменных сопротивлений, часто нелинейных. Находясь в поле излучения передающих или других устройств, переменные контакты и контакты с нелинейными сопротивлениями создают поля вторичного излучения, в спектре которых появляются составляющие, отличные от составляющих спектра, например, передающего устройства. Эти составляющие и создают контактные помехи приемным устройствам.

При совместной работе нескольких передатчиков или мощных близко расположенных устройств возможно образование комбинационных составляющих, расширяющих спектр контактных помех.

Таким образом, возникшие паразитные излучения, воздействуя на вход технически несовершенного приемного устройства, в случае проникновения оказывают мешающее воздействие и ухудшают работу устройств. Помехи могут воздействовать на приемное устройство в полосах основного и побочных каналов. Проявление побочных каналов приема в СВЧ-приемниках обусловлено наличием гетеродинных преобразователей в структуре устройства. Недостатки гетеродинных преобразователей – недостаточная частотная избирательность и нелинейные явления (схемная особенность данных элементов). Схемотехнические построения гетеродинных преобразователей не должны содержать побочных колебаний, так как они участвуют в образовании каналов приема.

Важно определить допустимые границы технического несовершенства входящих узлов приемников МРЛС. В настоящий момент действует ГОСТ 513.17.42.99, регламентирующий устойчивость к воздействию электрических разрядов и других паразитных влияний.

14. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ ЭМС/ЭМП СВЧ – ПРИЕМНЫХ УСТРОЙСТВ МРЛС

При проверке СВЧ-приемника МРЛС на помехоустойчивость и соответствие характеристикам ЭМС/ЭМП в первую очередь практически рассматриваются функционально необходимые параметры:

- электрическая прочность входных узлов (МШУ, ЗУ и др.);
- время восстановления МШУ, ЗУ СВЧ-приемника;
- восприимчивость СВЧ-приемника по блокированию каналов приема;
- восприимчивость по побочным каналам приема;
- восприимчивость по интермодуляции.

Существует также ряд других специализированных требований.

В качестве входных устройств СВЧ-приемников МРЛС широко используются новые приборы ЭСУ, ЭСКУ, ЦЗКУ, выполняющие функции малошумящего СВЧ-усиления и защиты входа, а также специализированные ЭЗУ, ЦЗУ. Такие циклотронные высокопотенциальные защитные устройства с малыми входными потерями обеспечивают возможность последующей установки маломощных сверхмалошумящих транзисторных усилителей для получения требуемого коэффициента шума.

Рассмотрим ключевые (в контексте электрозащиты и помехозащищенности) характеристики указанных ЭВП на примере разработки ЦЗКУ по данным разработчика.

а) Электрическая прочность.

Тепловая нагрузка входа приборов P_T определяется средней входной мощностью $P_{вх\text{ ср}}$ и КСВ входного тракта при воздействии $P_{вх\text{ ср}}$:

$$P_T = P_{вх\text{ ср}} \left[1 - \frac{(КСВ - 1)^2}{(КСВ + 1)^2} \right].$$

При $P_{вх\text{ ср}} \approx 300$ Вт, $КСВ \approx 30$ получим $P_T \approx 37$ Вт.

Данная тепловая мощность может быть рассеяна прибором без дополнительных мер по его охлаждению. Заданная импульсная СВЧ-мощность $P_{вх\text{ им}} \approx 6$ кВт обеспечивается в зазоре входного резонатора МШУ, равном 0,15 мм, так как пробивное напряжение в вакууме для зазора 1 мм составляет $U_{\text{макс}} = 100$ кВ (для зазора 0,15 мм, соответственно, 15 кВ).

Характеристические параметры входа приборов, по данным разработчика, дают возможность допуска до $P_{\text{вх имп}} \approx 12 \text{ кВт}$.

Блок-схема стенда для испытания МШУ ЦЗКУ, ЭСКУ, ЭСУ, ЦЗУ на электропрочность при воздействии большой СВЧ-мощности представлена на рис. 13. Результирующее значение падающей мощности $P_{\text{вх ср}}$ на испытуемый ЭСКУ определяется при известных ослаблениях направленных ответвителей 3, 6 и аттенюатора 8.

Постоянство характеристик приборов обеспечивается сохранностью его режимов (ток канала, ток коллектора и др.).

б) Время восстановления параметров МШУ (ЭСКУ и др.).

Подтвержденное разработчиками расчетное время восстановления параметров ЭСКУ и подобных устройств составляет примерно 5 нс. Время восстановления параметров последующих ТРУ, входящих в состав ЭСКУ или ЦЗКУ, на которые падает 5–10 мВт, составляет примерно 10 нс.

Блок-схема проверки времени восстановления $\tau_{\text{вост}}$ параметров ЭСКУ и других последующих узлов показана на рис. 14. Непосредственно измерения проводятся широкополосным прибором, например, Real Polve Meter.

в) Восприимчивость СВЧ-приемника по блокированию рабочего сигнала помехой.

Проверка восприимчивости по блокированию (D_1 , см. рис. 12, глава 11) проводится двухсигнальным методом на частотах $f_p - \Delta f$ и $f_p + \Delta f$ на измерительном стенде (рис. 15). Используются непрерывные немодулированные сигналы измерительных генераторов.

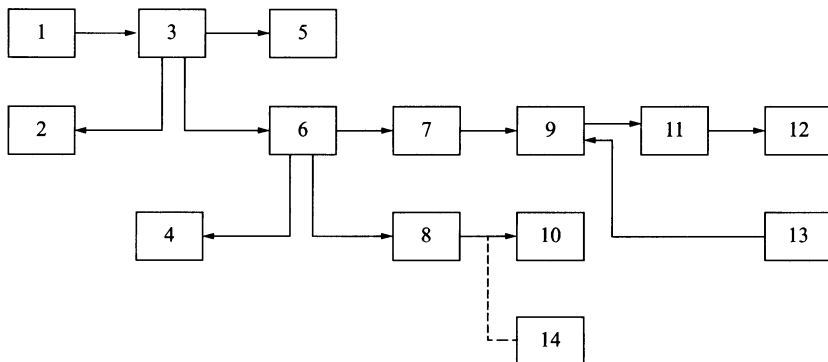


Рис. 13. Блок-схема стенда для испытания ЭСКУ на электропрочность:

1 – генератор высокого уровня мощности; 2, 4 – нагрузки согласования; 3, 6 – направленные ответвители; 5 – высокопрочная нагрузка; 7 – волноводный переход; 8 – калиброванный аттенюатор; 9 – испытуемый ЭСКУ; 10 – измеритель мощности; 11 – волноводный переход; 12 – согласованная нагрузка; 13 – блок питания ЭСКУ; 14 – широкополосный осциллограф с детекторной головкой

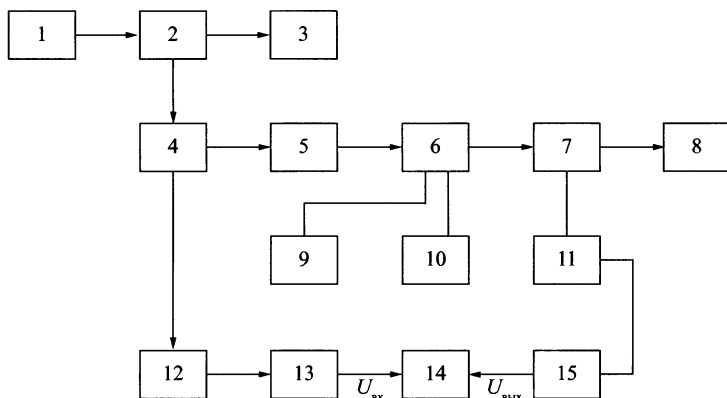


Рис. 14. Блок-схема стенда проверки времени восстановления $\tau_{\text{восст}}$ параметров ЭСКУ: 1 – генератор высокого уровня мощности; 2, 4 – направленные ответвители; 3 – нагрузки согласования; 5 – волноводный переход; 6 – испытываемое ЭСКУ; 7 – направленный ответвитель; 8 – согласованная нагрузка; 9 – блок питания ЭСКУ; 10 – контрольные приборы измерения режимов ЭСКУ; 11, 12 – установочный аттенюатор; 13, 15 – детекторная головка; 14 – широкополосный двухлучевой осциллограф

Отсчет задержки входного сигнала, равной его времени восстановления по требуемому уровню дополнительных потерь, проводится широкополосным двухлучевым осциллографом.

• Восприимчивость по блокированию рабочего сигнала

Стенд контроля восприимчивости приемного устройства по блокированию (D_1) представлен на рис. 15.

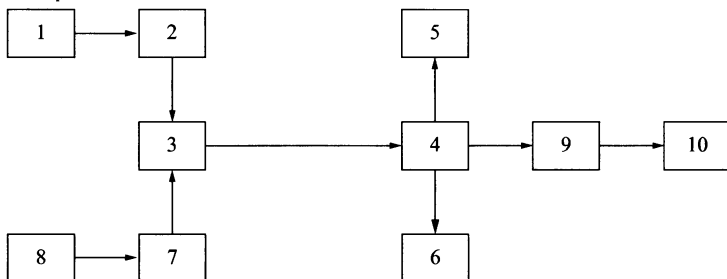


Рис. 15. Блок-схема контроля СВЧ-приемника на восприимчивость по блокированию: 1 – генератор рабочего сигнала; 2 – вентиль; 3 – тройник; 4 – переключатель; 5 – измеритель частоты; 6 – измеритель мощности; 7 – вентиль; 8 – генератор помехи; 9 – испытываемый приемник; 10 – анализатор спектра

Генератор сигнала устанавливается на f_p с уровнем D_0 на входе приемника. Генератор помехи с уровнем D_1 поочередно перестраивается в диапазонах частот от f_{\min} до $f_p - \Delta f$ и от $f_p + \Delta f$ до f_{\max} . Увеличивая мощность генератора рабочего сигнала, на индикаторе устанавливают отклик $\rho_{\text{оп}}$, удобный для измерения отношения «сигнал/шум», например, 10 дБ. При дальнейшей перестройке генератора определяют точки увеличения отклика $\rho_{\text{оп}}$ более чем на 3 дБ, в которых следует проанализировать причины воздействия помехи и при необходимости принять меры по его устранению.

• **Восприимчивость приемного устройства по побочным каналам приема**

Контроль восприимчивости приемного устройства по побочным каналам приема (рис. 16) проводится односигнальным методом в диапазонах частот от f_{\min} до $f_p - \Delta f$ и от $f_p + \Delta f$ до f_{\max} .

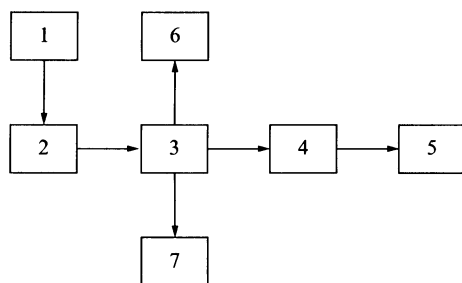


Рис. 16. Блок-схема контроля восприимчивости СВЧ-приемника по побочным каналам приема: 1 – измерительные генераторы; 2 – вентиль; 3 – переключатель; 4 – испытуемый приемник; 5 – анализатор спектра; 6 – измеритель частоты; 7 – измеритель мощности

При контроле используется немодулированный сигнал измерительных генераторов с уровнем $D_0 + D_2$ на входе приемника.

При изменении частоты измерительных генераторов в диапазоне контроля на анализаторе спектра не должно быть отклика, превышающего заданное минимальное значение ($\rho_{\text{оп}}$). В случае превышения значения отклика $\rho_{\text{оп}}$ следует провести измерения чувствительности по побочным каналам приема на частоте, где это наблюдается, определить количественное значение превышения уровня D_2 , проанализировать причины воздействия помехи и при необходимости принять схемно-конструктивное решение в целях его устранения.

• Восприимчивость приемного устройства по интермодуляции

Контроль восприимчивости по интермодуляции проводится двухсигнальным методом в диапазонах частот от f_{\min} до $f_p - \Delta f$ и от $f_p + \Delta f$ до f_{\max} .

Блок-схема контроля представлена на рис. 17.

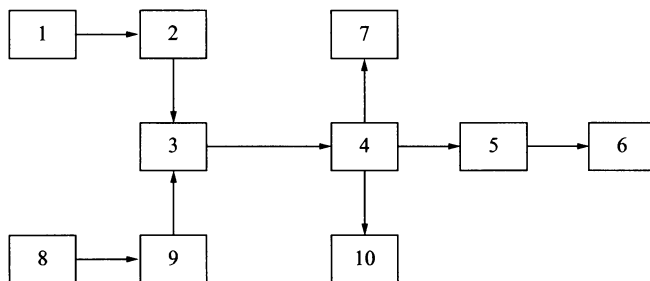


Рис. 17. Блок-схема контроля восприимчивости СВЧ-приемника по интермодуляции: 1 – генератор помехи 1; 2 – вентиль; 3 – тройник; 4 – переключатель; 5 – испытуемый приемник; 6 – анализатор спектра; 7 – измеритель частоты; 8 – генератор помехи 2; 9 – вентиль; 10 – измеритель мощности

В процессе контроля используются непрерывные сигналы измерительных генераторов. Генератор сигнала помехи 1 настраивается на частоту $f_p - \Delta f$, а частота генератора сигнала 2 изменяется от f_{\min} до $3f_p$, исключая неконтролируемую полосу $f_p \pm \Delta f$. Уровень сигналов от обоих генераторов на входе приемного устройства должен быть равен $D_0 + D_3$. При изменении частоты генератора помехи на анализаторе спектра не должно быть отклика, превышающего заданное минимальное значение ($\rho_{\text{он}}$). В случае отклонения отклика $\rho_{\text{он}}$ от требуемого значения следует провести измерения чувствительности по интермодуляции на частотах, где это наблюдается, и при необходимости принять схемно-конструктивные решения в целях его устранения.

Возможно проведение испытаний других характеристик СВЧ-приемника по согласованию с заказчиком.

15. СТАНДАРТИЗАЦИЯ ТРЕБОВАНИЙ ПО ЭМС/ЭМП СВЧ – ПРИЕМНЫХ УСТРОЙСТВ МРЛС

Начиная с 50-х годов XX века мероприятия по обеспечению ЭМС приемников проводились преимущественно с целью организации устойчивого радиоприема при воздействующих помехах в определенном районе. В качестве нормативно-технических требований ЭМС аппаратуры

были выбраны характеристики изделий или их элементов, которые нуждались в совершенствовании и стандартизации. Государственные стандарты, устанавливающие нормы промышленных радиопомех от технических средств различных групп, а также нормы нежелательных излучений радиопередающих устройств, являлись в тот период основными нормативными документами.

В 90-е годы XX века ужесточены международные требования электромагнитной совместимости РЭС с целью обеспечения нормального функционирования в окружающей ЭМО различных радиоприемных устройств в общетерриториальном масштабе и исключения опасности электромагнитных излучений для окружающей природной среды, жизни и здоровья людей.

Дальнейшее совершенствование регулирования в области ЭМС связано прежде всего с широким распространением в бытовых, связных, военных хозяйственных сферах технических средств, основанных на использовании микроэлектроники, компьютерной, сотовой техники, обладающей повышенной восприимчивостью.

Государственной Думой приняты законодательные акты, устанавливающие нормы, относящиеся к электромагнитной совместимости технических средств.

После 2000 года введено в действие значительное число новых государственных стандартов ЭМС, соответствующих нормам международных и европейских регламентирующих документов, устанавливающих требования к радиоэлектронным средствам по ограничению помехоэмиссии и обеспечению устойчивости (иммунитета) к электромагнитным помехам.

Появились новые специализированные средства измерений и испытательное оборудование для оценки и обеспечения соответствия требованиям ЭМС. В регионах России развернута сеть аккредитованных испытательных лабораторий радиоэлектронных средств по требованиям ЭМС. Сертификация электрической энергии по показателям качества стала обязательной.

Существующие российская и международная системы нормирования параметров ЭМС РЭС направлены на максимально возможное ужесточение параметров ЭМС приемников и передатчиков в связи со значительным увеличением объемов выпуска радиотехнической продукции. Однако при этом не учитывается связь между требованиями к параметрам ЭМС РЭС и условиями их эксплуатации в конкретной электромагнитной обстановке в точке приема. В то же время параметры ЭМС РЭС не должны быть ниже некоторого уровня, гарантирующего заданное качество приема полезного сигнала в используемой типовой ЭМО. Опыт развитых стран показывает,

что приемлемое ужесточение требований ЭМС, предъявляемых к РЭС, снижает риск причинения вреда человеку и окружающей среде радиотехническими средствами, позволяет создавать устройства, обладающие улучшенными техническими и эксплуатационными характеристиками, что является необходимым условием разработки и изготовления продукции, конкурентной на мировом рынке.

Внедрение и соблюдение новых стандартов в области ЭМС РЭС при разработке, производстве и испытаниях должны быть обеспечены новыми сертифицированными средствами измерений и испытательным оборудованием.

Важнейшей задачей отечественных предприятий – разработчиков и изготовителей РЭС всех видов и назначений является овладение современными технологиями обеспечения ЭМС:

- новыми требованиями ЭМС и методами испытаний, регламентированными современными международными, отечественными и европейскими стандартами ЭМС;
- конструированием РЭС, отвечающих всем современным требованиям ЭМС;
- новыми методами испытаний на помехоустойчивость и помехоэмиссию разрабатываемых и изготавливаемых РЭС;
- обязательным подтверждением соответствия РЭС требованиям ЭМС на основании процедур, действующих в Российской Федерации, странах Евросоюза и др.

Обеспечение помехозащищенности аппаратуры регламентировано государственными отраслевыми стандартами, содержащими требования к характеристикам ЭМС различных технических направлений.

Ниже перечислены некоторые действующие часто используемые специализированные стандарты, регламентирующие требования к характеристикам ЭМС радиотехнической и радиоэлектронной аппаратуры:

- ГОСТ РВ 5801-001-2008 «Радиоприемники. Требования по частотной избирательности»;
- ГОСТ РВ 52225-2004 «Радиоприемники. Методы измерений и контроля характеристик частотной избирательности»;
- ГОСТ РВ 52226-2004 «Устройства радиопередающие. Требования к основным параметрам внеполосных и побочных радиоизлучений (по тракту)»;
- ГОСТ РВ 5865-006-2010 «Устройства радиопередающие. Методы измерений и контроля уровней побочных и внеполосных радиоизлучений по электромагнитному полю»;
- ГОСТ Р 55898-2013 «Взаимные помехи в локальной группировке. Методы расчета»;

- ГОСТ В 25853-83 «Общие правила проведения испытаний и расчета ЭМС РЭС, размещаемых на объектах...»;
- ГОСТ В 25838-83 «Методы комплексной оценки ЭМС РЭС, размещаемых на объектах...»;
- ГОСТ В 25837-83 «Методы измерений ЭМС комплексов РЭС, размещаемых в пунктах управления...»;
- ГОСТ В 25803-91 «Радиопомехи промышленные от оборудования и объектов военного назначения. Нормы и методы испытаний»;
- ГОСТ ВДВ 50-668-88 «Методические указания по экспериментальному определению защитных отношений радиоприемных устройств»;
- ГОСТ РВ 5963-003-2009 «Модули СВЧ приемных устройств радиоэлектронных средств специального назначения»;
- ГОСТ Р 50397-92 «Термины и определения в области ЭМС»;
- ГОСТ Р 51318.14.2-99 (СИСПР 14-2-97) «Совместимость технических средств электромагнитная. Помехоустойчивость бытовых приборов, электрических инструментов и аналогичных устройств. Требования и методы испытаний». Применяется с 01.07.2001.

В ряде случаев разработчикам приходится ориентироваться на зарубежные стандарты, например, MIL STD-469B, STD-464A, STD-461E и др., в зависимости от требований заказчика.

Подробнее рассмотрим государственные отраслевые стандарты, применяемые при испытаниях антенно-приемо-передающих трактов МРЛС.

16. ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ОБЩИЕ СХМОТЕХНИЧЕСКИЕ И КОНСТРУКТИВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ ПО ЭМС/ЭМИ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К АППАРАТУРЕ МРЛС

Общие требования к интерфейсу, установленные российскими и зарубежными стандартами, например, MIL STD-464A, предполагают работу МРЛС в заданной ЭМО, а также молниезащиту, защиту персонала от электромагнитного излучения и другие специфические меры обеспечения безопасности.

При одновременной работе блоков или устройств в составе нескольких МРЛС не должны ухудшаться их рабочие характеристики или возникать непредвиденные сбои.

Воздействие трассовых помех (так же, как и ближних, внутренних) в аппаратуре должно быть ослаблено до приемлемого уровня приемами рационального конструирования и комплексом технологических и схмотехнических мер. Соответственно, должны выполняться частные и общие

конструктивные и схемотехнические требования и к аппаратуре СВЧ-приемников РЛС согласно отечественным стандартам. Рассмотрим основные общие требования ЭМС, предъявляемые к специализированным СВЧ-приемникам МРЛС.

1. Требования по ограничению величин воздействующих внешних помех.

ГОСТ Р 513.18.11.99 определяет нормы радиопомех от промышленных, научных и других высокочастотных устройств (согласован со специальным международным комитетом по радиопомехам СИСПР-11-97 и европейским стандартом ЕН55011-97). В соответствии с этим ГОСТ устанавливаются нормы индустриальных помех, применяемые к антенно-приемо-передающему устройству МРЛС.

Например, нормы напряжения индустриальных помех на сетевых зажимах (портах) должны соответствовать указанным в табл. 7.

Таблица 7

Нормы индустриальных помех

Полоса частот, МГц	Норма, дБ/мкВ	
	Квазипиковое значение	Среднее значение
0,15–0,5	79	66
0,5–30	73	60

2. Требования по помехоэмиссии устройств должны содержать:

а) нормы нежелательных паразитных радиоизлучений передающих устройств от их рабочих величин:

- побочные излучения – минус 50 дБ, не более 100 мВт,
- внеполосные излучения – минус 50 дБ, не более 100 мВт,
- допустимое отклонение частоты радиопередающих устройств

$$f_p \pm 5 \cdot 10^{-7} \text{ МГц};$$

б) нормы нежелательных излучений гетеродинов и контрольных генераторов приемных устройств:

- оценка и нормирование электромагнитных излучений диапазона частот 30 МГц – 300 ГГц осуществляются по величине энергетической экспозиции (ЭЭ). Для частот диапазона 30 МГц – 300 ГГц ЭЭ вычисляется по формуле

$$\text{ЭЭ} = \text{ППЭ} (\text{мкВт/см}^2) \cdot \text{ч},$$

где ППЭ – плотность потока энергии, мкВт/см²;

ч – время воздействия, ч.

Предельно допустимый уровень энергетических экспозиций электромагнитных помех в диапазоне частот 0,03–300 ГГц должен составлять 200 мкВт/см²·ч.

3. Требования устойчивости технических средств, входящих в РЛС, к внешним и внутренним электромагнитным воздействиям определяются стандартами серии ГОСТ Р 513.17.4, разработанными на основе международных стандартов МЭК серии 61000-4-2-95.

Указанные документы включают в себя требования к различным воздействиям.

3.1. Устойчивость к электростатическим разрядам (ГОСТ Р 513174.2-99, эквивалентные стандарты МЭК 61000-4-2, ЕН 61000-4-2). Требования и методы испытаний на устойчивость к электростатическим разрядам для аппаратуры МРЛС изложены в тех же ГОСТ.

В процессе испытаний используется метод воздушного разряда, приложенного к пластине связи, удаленной от испытуемого оборудования на расстояние 0,1 м.

Требования уровня жесткости разряда от 0,2 до 15 кВ устанавливаются в зависимости от размещения и окружающей среды. Испытательное напряжение должно быть указано в технической документации на конкретную аппаратуру.

3.2. Требования к испытательному радиочастотному электромагнитному полю (ГОСТ Р 51317.4.3-99, эквивалентные стандарты МЭК 61000-4-3, ЕН 61000-4-3).

Методика испытаний заключается в следующем. Излученное радиочастотное электромагнитное поле создается контрольно-измерительной антенной с предварительной калибровкой поля в согласованном диапазоне частот. При этом должны быть соблюдены требования к уровню неоднородности поля и расположению испытательного оборудования и соединительных кабелей, установленные стандартом.

3.3. Устойчивость к наносекундным импульсным помехам ЭМИ, в том числе большой энергии (ГОСТ Р 51317.4.4-99, эквивалентные стандарты МЭК 61000-4-4, ЕН 61000-4-4).

Методика испытаний: пачка наносекундных импульсных помех $\tau_n = 50$ нс, $\tau_{фр} = 5$ нс при частоте повторения импульсов 5 кГц и длительности пачки 15 мс или других согласованных параметрах подается при обеих полярностях между каждым из зажимов оборудования, предназначенных для подключения электросети (включая зажим защитного заземления), и эталонной плоскостью заземления; подача также может осуществляться с использованием емкостных клещей связи на цепи ввода-вывода.

Уровни жесткости 0,5, 1,2 и 4 кВ обеспечиваются при подаче наносекундных импульсных помех на линии электропитания; уровни,

составляющие половину от указанных значений, – при подаче помех на линии сигналов, передачи данных и управления, в зависимости от ожидаемой ЭМО.

3.4. Динамические изменения напряжения электропитания.

Динамические изменения напряжения электропитания должны быть $\leq 2\%$ в течение не менее 0,5 с.

3.5. Колебания напряжения электропитания.

Колебания напряжения электропитания должны составлять $\leq 1\%$.

3.6. Изменение частоты питающего напряжения.

Изменение частоты питающего напряжения должно быть $\leq 1,25\%$.

3.7. Гроза-молниевая защита.

При конструировании РЭС, расположенных в районах с интенсивными грозовыми явлениями, особое внимание следует уделять системам грозозащиты.

Согласно российским ГОСТ и MIL STD-464A МРЛС должна соответствовать эксплуатационным характеристикам в случаях прямого и непрямого воздействия грозовых разрядов, после воздействия разряда вблизи станции при работе и после прямого попадания во время хранения. Не существует способов предотвращения грозовых разрядов, но их влияние можно минимизировать за счет использования соответствующих конструктивных решений.

Влияние разрядов молнии можно разделить на прямое (физическое воздействие) и не прямое (электромагнитное). Физическое влияние грозовых разрядов выражается в выгорании и эрозии комплектующих элементов, взрыве и деформации конструкций, также возможно влияние волн высокого давления и магнитных воздействий, генерируемых большими токами. Непрямое влияние заключается в воздействии электромагнитных полей, связанных с грозовыми разрядами, и взаимодействии данных полей с оборудованием системы. Опасные виды воздействия могут породиться разрядами, не контактирующими напрямую с конструкцией системы (ближние разряды). В некоторых случаях на один и тот же компонент токоразряда могут воздействовать как физические, так и не прямые электромагнитные эффекты. Например, удар молнии в антенну, который физически ее повреждает, генерирует напряжение, способное повредить передатчик или приемник, подключенный к данной антенне.

Необходимость защиты от грозовых разрядов обусловлена также их возможным воздействием на людей. Например, грозовой разряд может привести к тяжелому поражению человека электрическим током через механические средства управления и кабели, ведущие к кабинам МРЛС. Одной из наиболее серьезных проблем является ослепление вспышкой человека, смотрящего в сторону разряда. Данное воздействие может продолжаться 30 с и более.

Специальные меры защиты для антенно-приемо-передающих МРЛС в значительной степени зависят от типов физической конструкции и используемого оборудования. Приборы или другие элементы, например, громоотводы, искрогасители, заземляющие решетку в полу, а также содержание влаги в почве влияют на степень защиты.

Руководства, содержащиеся в документах российских ГОСТ и MIL-E-4158, MIL STD-1542, MIL-HDBK-454, представляют различные подходы к проектированию защиты и снижению влияния грозовых разрядов на используемое оборудование. Формы токов, описанные в стандартах, представляют собой достижения техники в плане моделирования естественных сред грозовых разрядов с целью проверки и конструирования. Однако использование данных форм токов не гарантирует адекватность конструкции при взаимодействии с реальными грозовыми разрядами.

Защита МРЛС от воздействия молнии может основываться на следующем комплексе мер:

- использовании режима общей изоляции, когда отключаются все внешние связи от экранированного объема, в котором размещается радиоэлектронная аппаратура;
- использовании методов, позволяющих ослабить уровень помех в цепях РЭА;
- применении составных частей РЭА, обладающих повышенной стойкостью к действию электромагнитных полей.

3.8. Конструктивные методы грозозащиты:

- экранирование (экраны, прокладки, защита отверстий и кабельных вводов);
- зонирование и рациональное заземление.

3.9. Схемотехнические и структурно-функциональные методы защиты.

Схемотехнические методы:

- ограничение наводок по амплитуде (разрядники, полупроводниковые приборы и варисторы);
- ограничение наводок по спектру (фильтры, конденсаторы, индуктивности);
- ввод элементов оптоэлектроники;
- симметрирование.

Структурно-функциональные методы грозо-молниевой защиты подразумевают применение быстродействующих датчиков для отключения РЭА, ввод корректирующих кодов и т. д.

Защиту от воздействия молнии возможно выполнять по ступенчатому принципу:

1-я ступень – снижение амплитуды помехи до 1 кВ и менее (экраны, разрядники);

2-я ступень – снижение амплитуды помехи до 100 В и менее (фильтры и т. д.);

3-я ступень – снижение амплитуды помехи до 0,1 В и менее (высоко-частотные диоды).

17. ОЦЕНКА ЧАСТОТНО-ТЕРРИТОРИАЛЬНОГО РАЗМЕЩЕНИЯ МРЛС В ЛОКАЛЬНЫХ ГРУППИРОВКАХ

Каждая МРЛС, работающая в локальной группировке, должна иметь определенный диапазон рабочих частот и возможность быстрого перехода на запасные частоты, чтобы избежать помех, поставленных противником или посторонним РЭС. При одновременной работе группы радиолокационных станций вокруг антенн каждой РЛС образуется зона различных побочных излучений от частотно разнесенных РЛС, находящихся в группировке, и других средств, в том числе непосредственно не участвующих в боевой работе, но находящихся в окружающей местности. Необходимо определить уровень воздействующих помех, не ухудшающий работоспособность этих групп в условиях совместного использования в ближних и дальних зонах взаимодействия. Общая задача помехозащищенности достаточно сложна и зависима от множества факторов, нельзя не учитывать также влияния различных гармоник, интермодуляции и блокирования, в связи с чем соблюдение технических норм ОСТ и ГОСТ не дает гарантий полной помехозащиты. Здесь необходимо следование принципу: каждая РЛС должна реализовывать как свои функциональные параметры, так и параметры ЭМС, не мешая другой радиолокационной станции внутри заданной локальной территории.

Задачу можно решить в пределах конкретной локальной группировки, используя и улучшая характеристики антенно-приемо-передающих устройств. Для обеспечения боеспособности конкретной группировки РЛС дополнительно рекомендуется определить:

- реальный уровень внешних побочных излучений на входе антенн приемо-передающих устройств в ближней зоне взаимодействия различных РЛС группировки;
- допустимое защитное отношение «сигнал/шум» на входе приемных устройств при работах с различными воздействующими сигналами внутри группировки.

Эти и другие действия при отработке антенно-приемо-передающих устройств можно разделить на четыре этапа.

1. Отработка, согласно техническому заданию, схемотехнических решений узлов, блоков и устройства в целом при построении

СВЧ-приемников РЛС, предназначенных для работы в заданной частотно-территориальной группировке.

2. Рассмотрение технических аппаратурных характеристик ЭМС всего антенно-приемо-передающего поста для установки класса использования и соответствия требованиям нормативно-технической документации.

3. Предварительная расчетная оценка допустимого частотно-территориального разнosa в заданном участке рабочего диапазона частот различных МРЛС, размещаемых в предполагаемой совместной группировке.

4. Проведение оценочных испытаний антенно-приемо-передающих постов МРЛС.

Кратко рассмотрим перечисленные этапы.

Отработка схемотехнических решений СВЧ-приемника

Схемотехническое построение, удовлетворяющее требованиям ЭМС диапазонного СВЧ-приемника и передатчика, в частности подразумевает начальный выбор наиболее подходящих номиналов промежуточных частот при многократных преобразованиях (см. главу 10). Желательно, чтобы номинал первой промежуточной частоты был больше, чем величина рабочего диапазона. При этом рекомендуется руководствоваться условиями гетеродинного преобразования: $2f_{\text{пч1}} \neq nf_c$, $2f_c \neq nf_r$.

Частоты первого гетеродина могут быть как выше, так и ниже частот сигнала. При выборе частот гетеродина ниже частот сигнала зеркальные частоты окажутся ниже частот сигнала, и расчетным изменением поперечных размеров входных волноводных трактов до первого МШУ можно обеспечить их подавление за счет критических размеров волноводов, близких к запредельным для зеркальных частот. Важно не допустить попадания зеркальных частот на вход МШУ.

При выборе частот гетеродинов выше частот сигналов можно вывести зеркальные частоты за пределы рабочего диапазона радиолокатора и отсеять их заградительным фильтром. Выбор второй промежуточной частоты следует проводить таким образом, чтобы гетеродины первого и второго преобразователей были направлены в разные стороны. Тогда вторые зеркальные частоты будут отстроены от первой промежуточной частоты СВЧ-приемника. Если в СВЧ – диапазонном приемнике применять входные малoshумящие усилители типа ЦЗКУ или ЭСКУ, подавление сигналов зеркальных частот может достигать 80 дБ.

Первоначально выбранные частотные построения в устройствах входных приемников могут корректироваться в сетке частотно-территориальных распределений МРЛС. В разрабатываемой сетке частот сигналы РЛС близких литерных значений не должны давать с частотами гетеродинов

промежуточную частоту $f_{пч}$ или ее субгармонические составляющие $f_{пч1,2,3...}$, так как они ухудшают реальную чувствительность приема, а увеличение их входной мощности выше 10^{-5} Вт блокирует сигнал.

Необходимо получить минимальное количество комбинационных частот с учетом дальнейшего преобразования частоты сигнала в приемнике $f_{к\ мин}$ исходя из формулы

$$f_{к\ мин} = \frac{P \cdot f_r \pm f_{пч} \pm 1/2 \Delta f_{пч}}{g},$$

где P – номер гармоники гетеродина 1, 2, ..., 5;

g – номер гармоники мешающего сигнала;

$f_{пч}$ – промежуточная частота сигнала;

f_r – частота гетеродина;

$2 \Delta f_{пч}$ – полоса прозрачности пропускания сигнала.

Зеркальные каналы бортового приемника не должны совпадать с частотами наземных гетеродинов. В процессе схемотехнического и частотного построения СВЧ-приемника необходимо контролировать возможности появления частотных фокусов и не допускать, чтобы диапазоны первой и второй промежуточных частот противоречили «Регламенту радиосвязи» Международного союза радиосвязи.

Рассмотрение технических характеристик ЭМС антенно-приемо-передающего поста МРЛС для установки класса использования и его соответствия требованиям нормативно-технической документации

Заданные характеристики приемного устройства, передатчика и антенны определяют основные энергетические и частотные показатели разрабатываемой МРЛС. Выбор класса использования для определения соответствия нормам ОСТ и ГОСТ, в частности ГОСТ РВ 5801-001-2008 или зарубежных стандартов MIL STD-461E, MIL STD-469, производится по согласованию с заказчиком.

Внеполосные и побочные сигналы передающего устройства определяются по формулам ГОСТ РВ-52226-2004. Для достижения требований ГОСТ и ОСТ, по нашему мнению, можно использовать предложения, изложенные в данной монографии, а также в [7, 9].

Предварительная оценка допустимого частотно-территориального разнеса различных МРЛС, размещаемых в совместной предполагаемой группировке

Выбор сетки допустимого частотно-территориального разнеса различных средств в заданном заказчиком диапазоне завершает этап

отработки характеристик, в том числе ЭМС, СВЧ – диапазонного антенно-приемо-передающего тракта МРЛС.

В процессе оценки норм частотно-территориального разнosa следует установить распределение в заданном диапазоне спектральных составляющих излучаемых рабочих сигналов рассматриваемых РЛС, которые попадают в полосы прозрачности соседних радиолокационных станций, и возможности их частотной отстройки до приемлемых величин по заданному критерию качества.

В качестве примера проанализируем зависимость падения усредненного уровня спектральных составляющих от частоты f_p наиболее широкополосного импульса РЛС, аппроксимированного трапецией с параметрами $\tau_{\text{и}}=0,5$ мкс, $\tau_{\text{ф}}=0,1$ мкс (рис. 18). Далее рассмотрим возможности линейаризации и увеличения верхнего порога линейности приема СВЧ-приемника РЛС с целью уменьшения влияния сильных модуляционных помех. Последующие действия учитывают разработанную сетку сигнальных, гетеродинных, промежуточных частот СВЧ-приемника.

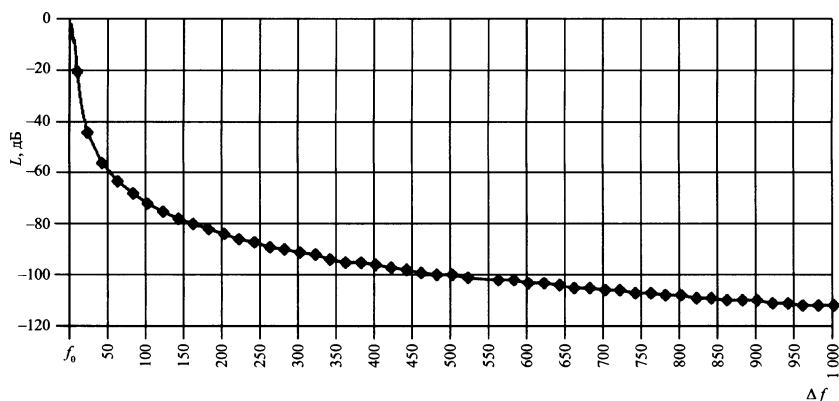


Рис. 18. Зависимость уровня спектральных составляющих трапецеидального импульса с параметрами $\tau_{\text{и}}=0,5$ мкс, $\tau_{\text{ф}}=0,1$ мкс от частоты

Достаточно надежным критерием качества функционирования приемника, работающего в условиях помех, исходящих от соседних РЛС в группировке, является величина защитного отношения, то есть допустимое превышение помехи над определенным уровнем сигнальной чувствительности, в частности шумовой.

Рассмотрим возможные связи частотно-территориального разнosa РЛС.

В качестве примера приведена таблица расчетов частотно-территориального расположения условных МРЛС 1, 2, входящих в группировку. В таблице представлены различные ориентации (Б-Б, Б-Ф, Ф-Ф) диаграмм направленности (ДН) антенн в ближней и дальней зонах взаимодействия ДН, условия распространения радиоволн на конкретных трассах с учетом защитных отношений, так как реально существующий тракт обработки сигналов (ТОС) по-разному ослабляет разные виды сигналов (табл. 8).

В табл. 8 приняты следующие обозначения:

$R_{\text{пр вид}}$ – расстояние прямой видимости МРЛС 1, 2 при заданной высоте взаимодействий h_1, h_2 ;

Б, Ф – боковой лепесток ДН и фон;

ΔF – разнос частот между МРЛС, задаваемый заказчиком.

Представленные расчеты уточняются для различных видов сигналов и методов их обработки. Например, сжатие рабочего сигнала по частоте сводится к тому, что в процессе приема устраняется фазовая (частотная) модуляция сигнала. Выходной сигнал повторяет форму (огibaющую) входного и имеет узкий спектр, соответствующий импульсу большой длительности. Отношение «сигнал/шум» на выходе приемника для рабочего сигнала возрастает, поскольку сложение происходит по амплитуде, а помеха складывается по мощности.

Величины ослаблений сигналов различной структуры в оптимальных приемниках некоторых сигналов представлены в табл. 9.

В табл. 9 приняты следующие обозначения:

$\Delta F_{\text{сп}}$ – эффективная ширина спектра помехи;

$\Delta F_{\text{доп}}$ – суммарная полоса доплеровских фильтров;

$F \cdot T$ – база сложных сигналов непрерывного ФМ-, ФКМ-, ЧМ-, ЛЧМ-сигнала;

F – ширина спектра сигнала;

T – длительность сигнала;

M – пачка импульсов.

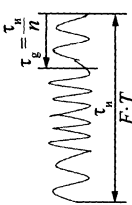
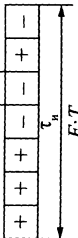
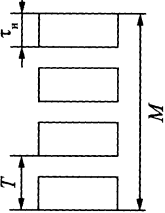
Применение допустимых защитных отношений при определении частотно-территориального разноса различных РЛС позволит установить более рациональные частотно-территориальные размещения РЛС в составе заданной локальной группировки.

Таблица 8
Расчет частотно-территориального расположения условных МРЛС, входящих в группировку

Передатчик, приемник	Связь, ДН	ΔF (мГц) 0		20	40	60	80	100	200	300	400	500	600	700
		ΔR (км)												
МРЛС 1, МРЛС 2 $h_1 = h_2 = 6$ м $R_{пр\text{ выд}} = 19,6$ км	Б-Б	53		38	17,5	7,8	4,4	2,7	0,7	0,31	0,175	0,11	0,078	0,055
	Б-Ф	45		6,9	1,75	0,78	0,44	0,27	0,07	0,031	0,017	–	–	–
	Ф-Ф	40		0,7	0,17	0,08	0,044	0,027	–	–	–	–	–	–

Таблица 9

Величины ослаблений сигналов различной структуры

Тип сигнала в приемнике	Непрерывный немодулированный сигнал	Частотная манипуляция, линейная частотная манипуляция	Фазовая манипуляция	Пачка импульсов
Вид помеховых сигналов				
Радиоимпульс	$10 \lg \frac{\Delta F_{\text{сн}}}{\Delta F_{\text{доп}}}$	$20 \lg 2FT$	$20 \lg 2FT$	$20 \lg \frac{1}{M}$
ФКМ-импульс	$10 \lg \frac{1}{2n}$	$20 \lg 2FT$	$20 \lg 2FT$	Широкополосные помехи
ФКМ непрерывный	$10 \lg \frac{\Delta F_{\text{сн}}}{\Delta F_{\text{доп}}}$	$20 \lg 2FT$	$20 \lg 2FT$	Узкополосные помехи
Пачка импульсов	$10 \lg \frac{\Delta F_{\text{сн}}}{\Delta F_{\text{доп}}}$	$20 \lg 2FT$	$20 \lg 2FT$	$20 \lg \frac{1}{M}$
Шумовая	$10 \lg \frac{\Delta F_{\text{сн}}}{\Delta F_{\text{доп}}}$	$10 \lg 2FT$	$20 \lg 2FT$	$10 \lg 2FT$

18. ПРОВЕДЕНИЕ ОЦЕНОЧНЫХ ИСПЫТАНИЙ АППАРАТУРЫ ПЕРЕДАЮЩИХ ПОСТОВ МРЛС

Испытания проводятся на изолированных участках местности или в экранированных боксах по согласованной программе. В общем случае задача оценочных испытаний должна решаться созданием систем диагностирования в виде экранированных кабин, выполняющих перечень нормализованных измерений, или других контролируемых средств. В связи с большим количеством измеряемых величин ручные средства технической диагностики целесообразно заменить на автоматизированные, что значительно повысит производительность процессов контроля, технических обследований, установления соответствия требованиям параметров ЭМС приемо-передающих постов МРЛС.

Примером могут служить перечисленные ниже работы по оценке ЭМС рассматриваемой условной группировки МРЛС. В предлагаемом перечне антенно-приемный пост МРЛС обозначен как МРЛС.

1. Оценка ЭМС разрабатываемых МРЛС включает аналитический расчет ЭМС средств, расположенных на позиции одного подразделения, в соседних подразделениях и в совместных группировках (общих территориальных районах).

Комплекс работ включает:

- рассмотрение протоколов предварительных испытаний по измерениям технических характеристик МРЛС;
- разработку исходных данных для проведения расчетной оценки ЭМС по требованиям ТЗ;
- оценку загрузки рабочих полос частот действующими в группировке МРЛС;
- определение перечня потенциально несовместимых РЭС для МРЛС, находящихся в территориальной зоне группировки;
- разработку типовых вариантов размещения рассматриваемой МРЛС в локальной группировке для оценки ЭМС;
- определение допустимого частотно-территориального разнеса или устранение потенциально несовместимых РЭС, размещенных в границах совместной локальной группировки (общих территориальных районах).

Далее по требованию заказчика могут быть проведены:

- оценка ЭМС МРЛС, размещенных на позиции одного подразделения;
- оценка ЭМС МРЛС, размещенных в соседних подразделениях;
- оценка ЭМС МРЛС, размещенных в совместных группировках (общих территориальных районах).

2. Рассмотрение исходных технических данных для проведения испытаний:

- протоколов испытаний МРЛС на соответствие требованиям ГОСТ РВ 52225, ГОСТ РВ 52226-04, ГОСТ В 26536-85, ГОСТ РВ 5801-001-200В, ГОСТ В 25803-91;
- разработанной рабочей конструкторской документации (РКД).

3. Более детальная проверка МРЛС в части выполнения ТЗ по ЭМС включает:

- проверку защищенности МРЛС от непреднамеренных радиопомех (НРП), создаваемых однотипными РЛС, а также другими потенциально несовместимыми РЭС, размещаемыми в совместных группировках;
- оценку возможности исключения или ослабления влияния НРП, создаваемых излучениями рассматриваемого МРЛС для других РЭС, размещаемых в совместных группировках;
- рассмотрение условий и режимов одновременной работы однотипных МРЛС, размещаемых на позиции одного подразделения, в соседних подразделениях, а также удаленных РЭС других типов общего частотного диапазона.

4. Методики испытаний предлагают использование требований следующих документов:

- ОТТ 1.1.3-1994 «Системы и комплексы (образцы) радиоэлектронной техники (РЭТ). Общие требования по радиоэлектронной защите»;
- ОТТ 1.2.3-2001 «Системы и комплексы (образцы) радиоэлектронной техники (РЭТ). Общие требования к методам государственных испытаний радиоэлектронных средств на радиоэлектронную защиту»;
- ГОСТ В 15.211-2001 «Порядок разработки программ и методик испытаний опытных образцов изделий» и др.

Изменения и дополнения в методику могут быть внесены по согласованию с заказчиком при изменении условий работы или размещения МРЛС в предполагаемой группировке, созданной для проведения испытаний в условиях, отличающихся от типовых или установленных в ТЗ.

В состав испытаний могут входить различные технические и организационные меры по защите МРЛС от непреднамеренных радиопомех, создаваемых однотипными РЛС, а также другими потенциально несовместимыми РЭС, размещаемыми в совместных группировках (общих территориальных районах).

5. Технические и организационные работы, направленные на уменьшение влияния помеховых излучений от других радиоэлектронных средств, размещаемых в совместных группировках (общих территориальных

районах), особенно работающих в совпадающих и смежных полосах частот, включающие в себя учет:

- перечня потенциально несовместимых МРЛС;
- условий обеспечения ЭМС при одновременной работе:
 - а) однотипных МРЛС, размещаемых на позиции одного подразделения;
 - б) однотипных МРЛС, размещаемых в соседних подразделениях на заданном удалении;
 - в) РЭС других типов общего частотного диапазона, удаленных от МРЛС на границу локальной группировки.

6. Требуемый частотный разнос $\Delta f_{\text{тр}}$, при котором обеспечивается ЭМС рассматриваемых МРЛС, определяется исходя из норм частотно-территориального разноса для двух случаев (а, б) в соответствии с выражением

$$\text{а) } \Delta P = P_{\text{н}}(\Delta f_{\text{тр}}) - P_0 = 0 \mid \text{при } R = \text{const},$$

где $\Delta f_{\text{тр}}$ – частотный разнос рассматриваемых РЭС;

ΔP – превышение помехи $P_{\text{н}}$ над допустимым уровнем пороговой чувствительности P_0 ;

R – расстояние.

Требуемый территориальный разнос $R_{\text{тр}}$, при котором обеспечивается ЭМС МРЛС, при заданном отношении ΔP определяется выражением

$$\text{б) } \Delta P = P_{\text{н}}(R_{\text{тр}}) - P_0 = 0 \mid \text{при } \Delta f = \text{const},$$

где $R_{\text{тр}}$ – требуемый территориальный разнос.

Заданный заказчиком критерий обеспечения ЭМС РЭС $P_{\text{доп}}$ определяется выражением

$$P_{\text{н}} \leq P_{\text{доп}}.$$

При выполнении указанного соотношения ЭМС оцениваемой пары РЭС считается обеспеченной.

7. Превышение мощности помехи над уровнем $P_{\text{доп}}$ определяется выражением

$$\Delta P = P_{\text{н}} - P_{\text{доп}}, \text{ дБ},$$

или абсолютным значением

$$\Delta P = P_{\text{н}} - P_0, \text{ дБ},$$

где P_0 – пороговая чувствительность приемника.

При согласовании значение допустимого уровня помех $P_{\text{доп}}$ может составлять

$$P_{\text{доп}} = P_{\text{п}} - K_3,$$

где $P_{\text{п}}$ – пороговая чувствительность приемника,

K_3 – согласованное с заказчиком защитное отношение «сигнал/помеха», введенное для основных видов сигналов и параметров непреднамеренных помех для данного МРЛС.

Применительно к РЭС, дислоцирующихся на позиции МРЛС, комплексный критерий обеспечения ЭМС для пары РЭС в дуэльной ситуации определяется выражением

$$\begin{cases} P_{\text{пр вх}}^{(\text{ПИ-ОКП})} \leq P_0 \\ P_{\text{пр вх}}^{(\text{ОИ-ПКП})} \leq P_0 + D_2, & P_{\text{пр вх}}^{(\text{ПИ-ПКП})} \leq P_0 + D_2, \\ P_{\text{пр вх}}^{(\text{ОИ-БЛ})} \leq P_0 + D_1, & P_{\text{пр вх}}^{(\text{ПИ-БЛ})} \leq P_0 + D_1, \end{cases}$$

где ПИ, ОИ – побочное или основное излучение;

ПКП, ОКП – побочный или основной канал приема;

$P_{\text{пр вх}}^{(\text{ОИ-ПКП})}$, $P_{\text{пр вх}}^{(\text{ПИ-ОКП})}$, $P_{\text{пр вх}}^{(\text{ПИ-ПКП})}$ – мощности $P_{\text{п}}$, создаваемые основным

или побочным излучением первой РЭС по основному и побочным каналам приема на входе приемника второй РЭС;

$P_{\text{пр вх}}^{(\text{ОИ-БЛ})}$, $P_{\text{пр вх}}^{(\text{ПИ-БЛ})}$ – мощности $P_{\text{п}}$, создаваемые ОИ (ПИ) первой РЭС,

блокирующие входные элементы высокочастотного тракта приемника второй РЭС;

P_0 – пороговая чувствительность радиоприемного устройства РЭС;

D_1 – динамический диапазон по блокированию входа приемника, дБ;

D_2 – динамический диапазон по побочным каналам приема, дБ.

По результатам оценочных испытаний корректируются протоколы измерений технических параметров и протоколы по ЭМС. В аппаратуру вносятся соответствующие изменения для достижения требуемой ЭМС МРЛС.

При этом применяются технические и организационные меры по защите МРЛС от непреднамеренных помех, которые создаются однотипными РЛС, а также потенциально несовместимыми РЭС, размещаемыми в совместных группировках (общих территориальных районах), и другими радиоэлектронными средствами, работающими в совпадающих и смежных полосах частот, а также РЭС других частотных диапазонов при заданном расстоянии между ними. При невозможности самозащиты МРЛС решается вопрос об их удалении из состава группировки.

Формируются перечни потенциально несовместимых РЭС, которые сводятся в табл. 10.

Таблица 10

Потенциально несовместимые РЭС

№ п/п	Наименование (шифр) РЭС	Тип РЭС	Вид излучения РЭС	Каналы источников помех МРЛС

Далее рассматриваются возможные числовые значения частотного и территориального разнеса МРЛС с одностипными РЭС и другими потенциально несовместимыми РЭС, размещаемыми на одной позиции, а также в совместных группировках (общих территориальных районах). Нормы частотного разнеса указывают в приложении к протоколу испытаний.

В итоге формируются условия обеспечения ЭМС МРЛС на позиции, соседних позициях, а также в совместных группировках (общих территориальных районах).

Например, условия обеспечения ЭМС изделия МРЛС на позиции предлагается оформить в виде табл. 11.

Таблица 11

Условия обеспечения ЭМС МРЛС

Шифр РЭС	Варианты частотного взаимодействия	Взаимная ориентация ДНА	Уровень НРП $\Delta P_{\text{ПКП(БЛ)}}$, / $D1_{\text{ТР}}$, $D2_{\text{ТР}}$, дБ			
			Расстояние между РЭС, м			
МРЛС-1						
МРЛС- <i>n</i>						

Возможны варианты частотного взаимодействия диаграмм направленности антенн: (ОИ – ОКП), (2Г – ОКП), (3Г – ОКП), (ОИ – ПКП), (ОИ – БЛ), где 2Г, 3Г – гармоники гетеродинов, ОКП, ПКП – основной и побочный каналы приема.

Возможны варианты взаимной ориентации ДНА РЭС: (О × Б), (Б × Б), (Б × Ф), (Ф × Б), (Ф × Ф), где О, Б, Ф – основной, боковой лепестки и фоновое излучение МРЛС.

Аналогичная таблица может быть оформлена для условий обеспечения ЭМС МРЛС, располагающихся и на прилегающих позициях.

По завершении всего комплекса перечисленных работ производится обработка, анализ и оценка результатов испытаний.

На основании анализа принятых технических мер по защите МРЛС от непреднамеренных радиопомех, которые создаются одностипными или другими потенциально несовместимыми РЭС, размещаемыми в совместных локальных группировках (общих территориальных районах),

и организационных мер по исключению помех, создаваемых соседними радиоэлектронными средствами, определяются условия обеспечения ЭМС и делается вывод о соответствии МРЛС требованиям ТТЗ заказчика, обеспечивающим частотно-территориальное размещение в локальной группировке.

19. НЕКОТОРЫЕ ФОРМУЛЫ ДЛЯ РАБОТЫ С ЭМС/ЭМИ

Таблица 12

Формулы для расчета ЭМС/ЭМИ

Наименование	Гауссова система	СИ
Закон Кулона	$F = \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$	$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$
Напряженность электрического поля точечного заряда	$E = \frac{F}{q}$	$E = \frac{q}{r^2}$
Напряженность поля точечного заряда		$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{r^2}$
Напряженность поля вблизи поверхности проводника	$E = 4\pi\sigma$	$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$
Поток напряженности электрического поля через поверхности	$\Phi_E = E_n S$	
Теорема Гаусса	$\Phi_E = 4\pi q$	$\Phi_E = \frac{q}{\epsilon_0}$
Потенциал электрического поля	$\varphi = \frac{A}{q}$	
Потенциал поля точечного заряда	$\varphi = \frac{q}{r}$	$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{r}$
Связь между напряженностью и потенциалом электрического заряда	$E_l = -\frac{\Delta\varphi}{\Delta l}$	

Продолжение таблицы 12

Наименование	Гауссова система	СИ
Емкость	$C = \frac{q}{U}$	
Емкость плоского конденсатора с диэлектриком	$C = \frac{\epsilon \cdot s}{4\pi a}$	$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon \cdot s}{a}$
Энергия системы зарядов	$W_s = \frac{1}{2} \sum q_i \varphi_i$	
Энергия конденсатора	$W_s = \frac{1}{2} C U^2$	
Плотность энергии электрического поля	$W^2 = \frac{E^2}{8\pi}$	$W_s = \frac{\epsilon_0 E^2}{2}$
Сила тока	$I = \frac{dq}{dt}$	
Закон Джоуля – Ленца	$Q = I^2 \cdot R \cdot t$	
Индукция магнитного поля прямого тока	$B = \frac{1}{C} \cdot \frac{2I}{r}$	$B = \frac{M_0 I}{2\pi r}$
Индукция магнитного поля в центре кругового тока	$B = \frac{1}{C} \cdot \frac{2\pi I}{r}$	$B = \frac{M_0 I}{2 \cdot R}$
Индукция поля в соленоиде	$B = \frac{4\pi}{C} nI$	$D = M_0 nI$
Закон Ампера	$F = \frac{1}{C} IB \sin \alpha$	
Поток магнитной индукции	$\Phi_M = \sum B_n \Delta S$	
Закон электромагнитной индукции	$\Phi_s = \frac{1}{C} \cdot \frac{d\varphi}{dt}$	$\Phi_s = -\frac{d\varphi}{dt}$

Окончание таблицы 12

Наименование	Гауссова система	СИ
Индуктивность	$\Phi = \frac{1}{C} LI$	$\Phi = LI$
Индуктивность соленоида	$L = 4\pi n^2 V$	$L = M_0 n^2 V$
Магнитная энергия тока (энергия магнитного поля)	$W_m = \frac{1}{C^2} \cdot \frac{LI^2}{2}$	$W_m = \frac{LI^2}{2}$
Плотность энергии магнитного поля	$\omega_m = \frac{B^2}{8\pi}$	$\omega_m = \frac{B^2}{2M_0}$

В табл. 12 приняты следующие обозначения:

α – заряд, создающий электрическое поле;

r – расстояние между зарядами;

ϵ_0 – электрическая постоянная, $\epsilon_0 = 8,855 \cdot 10^{-12}$ Ф/м;

F – сила;

E – напряженность, силовая характеристика поля, $E = \frac{F}{d}$;

φ – потенциал, $\varphi = \frac{A}{d}$;

A – работа, сила поля;

U – разность потенциалов;

σ – поверхностная плотность зарядов;

W – энергия;

B – индукция магнитного поля прямого тока;

I – сила тока;

L – индуктивность соленоида;

C – емкость конденсатора с диэлектриком;

d – расстояние между пластинами конденсатора;

l – длина действия поля в конденсаторе;

V – потенциал;

S – площадь;

q – единица точечного заряда в СИ;

R – сопротивление участка цепи проводника.

20. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Поскольку МРЛС образуют локальные группировки, каждая радиолокационная станция должна находиться в определенных границах указанной зоны и иметь утвержденные нормы частотно-территориального распределения средств внутри используемого пространства. С учетом тактики применения средств внутри локальной зоны определяются необходимые параметры защиты размещаемых средств. Анализ всей системы с точки зрения электромагнитной защиты входящих в нее устройств может быть завершен согласованными с заказчиком работами.

Для успешного выполнения задач, поставленных перед МРЛС, кроме рассмотренных вопросов ЭМС, должны обеспечиваться необходимые функционально-технические характеристики, надежность, весовые данные, оптимальное соотношение объема и габаритов, электрогерметичность, определенная стоимость, гарантийный срок службы и т. д. Комплекс требований к МРЛС и необходимый набор характеристик должны быть согласованы заказчиком и разработчиком.

ЛИТЕРАТУРА

1. Уильямс Т. ЭМС для разработчиков продукции. – М.: Издательский дом «Технологии», 2003. – 540 с.
2. Петровский В.И., Сидельников Ю.Е. ЭМС радиоэлектронных средств. – М.: Радио и связь, 1986. – 216 с.
3. Уильямс Т., Армстронг К. ЭМС для систем и установок. – М.: Издательский дом «Технологии», 2004. – 508 с.
4. Бартон Д., Хилл К. Радиолокационные системы. – М.: Военное издательство МО, 1988. – 480 с.
5. Вейсблат А.В. Коммутационные устройства СВЧ на полупроводниковых диодах. – М.: Радиосвязь, 1987. – 210 с.
6. Плешивцев В.И., Будзинский Ю.А. Усовершенствование защиты и ЭМС СВЧ приемников для многоканальных активных фазированных антенных решеток // Электромагнитные волны и электронные системы. № 4. 2012. – С. 25–29.
7. Плешивцев В.И., Градова Т.И. Оптимизация элементов диапазона СВЧ-приемника, улучшающая помехозащищенность РЛС // Вестник ВКО. № 2 (6). 2015. – С. 26–33.
8. Плешивцев В.И. СВЧ-приемники радиолокационных систем. Монография. – М.: Радиотехника, 2012. – 184 с.
9. Плешивцев В.И., Градова Т.И., Орехов М.Б. Реализация требований электромагнитной совместимости в части побочных каналов приема на примере приемо-преобразовательных модулей СВЧ приемника // Электромагнитные волны и электронные системы. № 3. 2015. – С. 36–40.
10. Будзинский Ю.А., Кантюк С.П. Электростатические усилители // Электронная техника. Техника СВЧ. Серия № 1. Вып. № 1. 1993. – С. 21–27.
11. Плешивцев В.И., Градова Т.И., Орехов М.Б. ЭМС и помехозащищенность СВЧ-приемников МРЛС, работающих в группировке // Электромагнитные волны и электронные системы. № 4. 2015. – С. 61–66.
12. Князев А.Д. Элементы теории и практики обеспечения ЭМС радиоэлектронных средств. – М.: Радио и связь, 1984. – 336 с.
13. Проектирование радиолокационных устройств / под ред. Соколова М. – М.: Советское радио, Высшая школа, 1984. – 335 с.

14. *Плешивцев В.И., Градова Т.И.* СВЧ-приемники, обеспечивающие ЭМС РЛС в составе локальных группировок // Вестник ВКО. № 1. 2013. – С. 27–34.
15. *Плешивцев В.И.* Особенности построения диапазонных СВЧ-приемников МРЛС с ФАР и АФАР // Вестник ВКО. № 1. 2014. – С. 75–81.
16. *Балюк Н.В.* и др. Мощный электромагнитный импульс: воздействие на электронные средства и методы защиты. Серия «Библиотека ЭМС». – М.: ООО «Группа ИДТ», 2008. – 478 с.
17. *Кечиев Л.Н.* и др. Защита электронных средств воздействия статического электричества. Серия «Библиотека ЭМС». – М.: Издательский дом «Технологии», 2005. – 352 с.

Научное издание

**ПЛЕШИВЦЕВ ВИТАЛИЙ ИВАНОВИЧ
ГРАДОВА ТАТЬЯНА ИВАНОВНА**

**ОЧЕРКИ ОБ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ
СОВМЕСТИМОСТИ И ПОМЕХОЗАЩИЩЕННОСТИ
СВЧ-ПРИЕМНИКОВ РЛС**

Корректор В.В. Стебнева
Компьютерная верстка В.И. Карповой

Сдано в набор 05.09.2018. Подписано в печать 20.11.2018.

Формат 60 × 90/16. Гарнитура Times New Roman.

Печать офсетная. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 7,5. Тираж 150 экз. Заказ № 133105

ПАО «НПО «Алмаз»

125190, Москва, Ленинградский пр-т, д. 80, к. 16

Телефон: +7 (499) 940-02-22, факс +7 (499) 940-09-99

E-mail: info@raspletin.com

www.raspletin.com

Отпечатано в ООО фирма «Юлис»

392000, г. Тамбов, ул. Монтажников, д. 9

◆ OEU448
315.5 kts 9662 ft

◆ IUC
305

▶ PWW
348.9 kts 9045 ft

◆ UYZ207
268.0 kts 9874 ft

▶ BEA880
298.7 kts

◆ VVW654
307.2 kts

◆ OMH772
302.9 kts

ISBN 978-5-9908060-5-4



9 785990 806054