

СОДЕРЖАНИЕ

Журналу „Известия вузов. Приборостроение“ — 50 лет.....	3
ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ	
Дмитриев А. К., Кравцов А. Н. Информационно-поисковая система диагностирования объекта на основе принципа согласованного оптимума.....	5
Алешкин А. П., Гавриленко А. В., Иванов К. В., Красный В. П., Новиков В. А., Хоружий А. И. Метод обработки радиолокационных характеристик малого космического аппарата с учетом априорных ограничений.....	13
Долгов А. И., Ваниюлин Е. В. Метод функциональной коррекции устройств преобразования данных с временной избыточностью.....	17
Багаутдинов З. З., Гейда А. С., Лысенко И. В. Моделирование и оценивание эффективности комплекса мероприятий на основе алгебры нечетких чисел.....	21
ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ	
Бочков А. Л., Дударенко Н. А., Ушаков А. В. Синтез многомерных функционально вырожденных динамических систем.....	25
Григорьев В. В., Медынский Ю. В., Мотылькова М. М., Мансурова О. К. Прогнозирование процесса вертикальной качки корабля.....	29
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА	
Бураков В. В. Методика оценки качества программных средств.....	35
ЭЛЕКТРОННЫЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА	
Ершов С. О., Майер П. Системы технического зрения с невизуальным представлением пространственной информации.....	42
Галайдин П. А. Расчет аксиального градиентного модуля магниторезонансного томографа.....	47
Холкин В. Ю. Модель барьерного механизма возникновения $1/f$ -шума в полупроводниковых устройствах.....	54
ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ	
Мачихин А. С. Автоматическое восстановление изображений, искаженных прямолинейным равномерным смазом.....	59
Фефилов Г. Д. Синтез оптимальной весовой функции и методы ее реализации в лазерной дифрактометрии микрообъектов.....	64
Филиппова И. С., Алексеева Л. В., Повх И. В., Строганов В. И. Оптическая система из двух призм с анизотропными свойствами.....	69
Андреев Л. Н., Комарова Ю. А. Коррекция сферической аберрации в двухзеркальной концентрической оптической системе.....	70
РЕФЕРАТЫ.....	75

CONTENTS

50 Years of the Journal	3
INFORMATION TECHNOLOGIES AND SYSTEMS	
Dmitriev A. K., Kravtsov A. N. Information Retrieval System of Object Diagnosing on the Basis of a Principle of a Matched Optimum.....	5
Aleshkin A. P., Gavrilenko A. V., Ivanov K. V., Krasni V. P., Novikov V. A., Norugi A. I. Processing Method of Radar Characteristics of a Small Space Vehicle in Conditions of A Priori Limitations	13
Dolgov A. I., Vanyulin E. V. Method of Functional Correction of Data Conversion Arrangements with Temporary Redundancy	17
Bagautdinov Z. Z., Gayda A. S., Lysenko I. V. Simulation and Estimation of Efficiency of the Complex of Measures on the Basis of Fuzzy Numbers Algebra	21
DEVICES AND SYSTEMS OF AUTOMATIC CONTROL	
Bochkov A. L., Dudarenko N. A., Ushakov A. V. Synthesis of Many-Dimensional Functionally-Degenerated Dynamic Systems	25
Grigoriev V. V., Medynsky Yu. V., Motylkova M. M., Mansurova O. K. Process Forecasting of Vertical Heaving of a Ship	29
COMPUTING TECHNIQUE	
Burakov V. V. Evaluation Method of Software Quality	35
ELECTRONIC AND ELECTROMAGNETIC DEVICES	
Ershov S. O., Meijer P. Technical Vision Systems with Non-Visual Performance of the Spatial Information	42
Galaydin P. A. Calculation of Axial Gradient Module for NMR Tomograph.....	47
Kholkin V. Yu. Model of the Barrier Mechanism of a $1/f$ -Noise Origin in Semiconductor Devices	54
OPTICAL AND OPTO-ELECTRONIC INSTRUMENTS AND SYSTEMS	
Machikhin A. S. Automatic Recovery of Images Degraded by Uniform Straight-Line Motion Blur.....	59
Fefilov G. D. Synthesis of an Optimum Weight Function and Methods of its Implementation in a Laser Diffractometry of Microscopic Objects.....	64
Filippova I. S., Alexeeva I. V., Povh I. V., Stroganov V. I. Optical System from Two Prisms with Anisotropic Properties.....	69
Andreev L. N., Komarova Yu. A. Correction of a Spherical Aberration in a Two-Mirror's Concentric Optical System	70
ABSTRACTS	75

Editor-in-Chief L. F. Porfiriev

Журналу „Известия вузов. Приборостроение“ — 50 лет

Пятьдесят лет назад, в 1958 г., был выпущен первый номер журнала „Известия вузов СССР — Приборостроение“. Появление нового научного журнала в структуре государственной системы высшего образования было обусловлено невиданными темпами технического прогресса в области теории и практики управления подвижными объектами и технологическими процессами в различных отраслях производства.

Страна быстро наращивала научное и техническое могущество. Шло практическое освоение атомной энергии как для создания оружия массового уничтожения, так и для обеспечения жизни и производственной деятельности человека энергетическими ресурсами на многие поколения в будущем. Эти же годы характеризуются быстрым развитием реактивной авиации и ракетной техники. Появились первые баллистические ракеты, технические достижения в области совершенствования которых привели к практическому освоению космоса. Начали быстро создаваться и развиваться соответствующие автоматизированные информационно-измерительные и управляющие приборные системы и комплексы, что во многом способствовало прогрессу в перечисленных областях техники.

Одним из важнейших факторов, в значительной степени определившим темпы прогресса в науке, технике, производстве и в создании современной среды обитания во второй половине XX века, явилось широкое внедрение цифровой техники, обусловившей последующее развитие смежных областей, таких как электроника, физика твердого тела, оптика, нейрофизиология, и других научных и технических направлений.

Для того чтобы страна могла успешно решать практические задачи, связанные с отмеченными тенденциями научно-технического и социального прогресса, необходимы были высококвалифицированные научные и инженерные кадры. Государственная система высшего образования была достаточно подготовлена для решения этой задачи в кратчайшие сроки. В этой связи Министерством высшего образования в 1957 г. и было принято решение об организации под его эгидой регулярного издания ряда научных журналов „Известия вузов СССР“ по различным отраслям науки и техники, в том числе и по разделу „Приборостроение“. Журналы были призваны оперативно отражать научные и технические идеи и разработки преподавателей, ученых и сотрудников высшей школы, что способствовало бы, с одной стороны, быстрейшему внедрению этих разработок в промышленность, а с другой — росту квалификации самих ученых на опыте решения практических задач. Это сказалось и на уровне квалификации выпускаемых специалистов, и на интеграции усилий работников учебных заведений и промышленности в решении задач научно-технического прогресса.

Решению этих задач была посвящена деятельность журнала „Известия вузов. Приборостроение“, который чутко реагировал на приоритетные тенденции в развитии мирового приборостроения. Учитывая современные тенденции развития науки и техники, журнал начал публиковать материалы, посвященные использованию физиологических и биологических принципов построения нейросетей и нейроструктур, в какой-то мере объясняющих работу головного мозга и нервных систем живых организмов и человека при управлении их поведением и эмоциями в различных ситуациях общения с окружающим миром и при интеллектуальной деятельности.

Наряду с широким освещением проблем приборостроения в журнале всегда большое внимание уделялось высокому научному и практическому уровню публикуемых материалов. В состав его редакционной коллегии входили выдающиеся ученые. Так, в разное время членами редколлегии журнала являлись: доктора наук профессора В. В. Солодовников, Н. В. Бутенин, А. В. Фатеев, В. А. Бесекерский, А. Н. Дмитриев — по разделу „Приборы и системы автоматического управления“, С. А. Майоров и Ю. М. Смирнов — по разделу „Вычислительная техника“, З. М. Аксельрод и С. А. Изенбек — по разделу „Приборы точной механики“, К. С. Ухов и Л. А. Северов — по разделу „Гироскопические и навигационные системы“, В. Н. Чуриловский, Н. П. Заказнов, Г. М. Мосягин — по разделу „Оптические и оптико-электронные приборы и системы“, Г. Н. Дульнев и Н. А. Ярышев — по разделу „Тепловые режимы и надежность приборов и систем“, Ю. Г. Ростовцев, А. В. Фремке, А. А. Преображенский — по разделу „Информационно-измерительная техника“, и ряд других выдающихся ученых в области приборостроения. Профессора Н. А. Ярышев и Ю. Г. Ростовцев до сих пор активно работают в редколлегии журнала. Первым, кто возглавил редакционную коллегию, был проф. С. И. Зилитинкевич, в 1972 г. эстафету принял проф. Б. А. Арефьев, в настоящее время главным редактором является проф. Л. Ф. Порфирьев.

В течение многих лет редколлегия и редакция журнала прилагают большие усилия к тому, чтобы научный, редакционный и полиграфический уровень журнала соответствовал требованиям современности. Свидетельством, подтверждающим оправданность этих усилий, является то, что на протяжении ряда лет журнал входит в перечень изданий, рекомендуемых Высшей аттестационной комиссией для публикации работ, связанных с защитой кандидатских и докторских диссертаций.

О высоком научном уровне журнала свидетельствует также и то, что он распространяется во многих ведущих в области приборостроения странах мира. Еще в 1991 г. тираж журнала составлял более 3 тысяч экземпляров ежемесячно. К сожалению, в связи с распадом СССР, последующим инфляционным обвалом и удручающим развитием событий в области производства, науки и образования начиная с 1992 г. тиражи резко упали, а регулярность выхода в свет сильно нарушилась. Однако благодаря усилиям членов редколлегии и редакции, творческий потенциал и органическую необходимость интеллектуальной деятельности которых невозможно ограничить материальными трудностями, регулярный выпуск журнала был восстановлен, чем был внесен большой вклад в дело сохранения научных коллективов и повышения интереса к научным исследованиям.

Редколлегия и редакция журнала

А. К. ДМИТРИЕВ, А. Н. КРАВЦОВ

*Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского
Санкт-Петербург*

ИНФОРМАЦИОННО-ПОИСКОВАЯ СИСТЕМА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ОБЪЕКТА НА ОСНОВЕ ПРИНЦИПА СОГЛАСОВАННОГО ОПТИМУМА

Предлагается алгоритм построения оптимальной программы идентификации состояния объекта при совместном использовании двух показателей: полезности получаемой информации и сопутствующих затрат. Приводится пример реализации программы.

Информационно-поисковые системы (ИПС) широко применяются при испытаниях и штатной эксплуатации дистанционно управляемых технических объектов. Данные объекты формально представляются в виде совокупности характерных признаков, которую называют состоянием источника информации. Задача информационного поиска заключается в идентификации передаваемого сообщения о состоянии объекта с одним из модельных (эталонных) сообщений, хранящихся в базе знаний поисковой системы и характеризующих возможные технические состояния (ТС) при заданной глубине поиска. Необходимо, чтобы идентифицируемое и модельное сообщения имели одинаковые *длину* и *глубину*. Длина сообщения равна числу его разрядов (числу контролируемых признаков), а глубина — числу букв (цифр, знаков, символов и т. п.) *алфавита*, входящих в эти разряды. Из букв алфавита составляются модельные сообщения, образующие в совокупности *словарь* сообщений, который является моделью распознаваемых видов ТС объекта (последние также называются *модельными* ТС).

Такая организация поиска осуществляется в случаях, когда в качестве букв алфавита используют двузначные (0, 1) или многозначные (1, 2, ..., ω) признаки, называемые *дискретными*. Задача оптимизации поиска заключается в построении процедуры, которая позволяет найти для любого из принятых сообщений соответствующее модельное ТС путем проверки совпадения только части специально выбранных наиболее полезных (*релевантных*) признаков. Можно ожидать, что при этом повышается экономичность поисковой процедуры без ущерба для ее результативности. Однако может оказаться, что выбранные признаки являются слишком „дорогими“ в смысле затрат на их проверку и ожидаемый эффект будет совсем незначительным или вовсе отсутствовать.

Для разрешения этой конфликтной ситуации используем *принцип согласованного оптимума* [1], в соответствии с которым оптимизируемую целевую функцию представим в виде

$$Q(G) = F[J(G), \bar{C}(G)], \quad (1)$$

где $J(G)$ — показатель полезности (ценности) информации, получаемой с помощью синтезированной программы G ; $\bar{C}(G)$ — средние затраты, связанные с реализацией данной программы.

Для решения задачи воспользуемся предложенными в работе [2] моделями объекта. Основными элементами этих моделей являются: $S = \{S_i \mid i = \overline{1, m}\}$ — множество модельных ТС; $\Pi = \{\pi_j \mid j = \overline{1, n}\}$ — множество диагностических признаков (ДП), на котором все модельные ТС попарно различимы; $\hat{\Pi} = \{\hat{\pi}_j \mid j = \overline{1, n}\}$ — множество проверок ДП (очевидно, что множества Π и $\hat{\Pi}$ находятся во взаимно однозначном соответствии); $\sigma = \{s_{ij} \mid i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n}\}$ — множество значений ДП в разных ТС; $\Omega_k = \{R_k \mid R_k \subset S\}$ — множество промежуточных информационных состояний (ИС), которые могут возникать при заданных S и Π ; $\Pi_k \subseteq \Pi$ — подмножество допустимых для проверки признаков в ИС $R_k \in \Omega_k$.

Требуется построить ИПС G , определяющую состав и последовательность выполнения проверок, обеспечивающих распознавание любого ТС, такую что

$$G = \arg \max_{G_r \in U} \{Q(G_r)\},$$

где G_r — r -й вариант программы из множества U всех ее возможных вариантов.

Искомую ИПС представим в виде ориентированного граф-дерева, корневая вершина которого соответствует начальному ИС $R_k = S$, висячие вершины — конечным ИС $R_i = \{S_i\}$, $i = \overline{1, m}$, а все остальные (неконечные) вершины — промежуточным ИС $R_k \subset S$. Граф также обозначим символом G . Дуги графа соответствуют исходам проверок ДП в каждом неконечном ИС R_k . Путь от начального к конечному ИС R_i , $i = \overline{1, m}$, назовем i -й ветвью ИПС. Упорядоченное подмножество ДП, входящих в i -ю ветвь, обозначим символом Π_i . По результатам проверок ДП $\pi_j \in \Pi_i$ идентифицируется i -е ТС объекта $S_i \in S$.

Таким образом, необходимо определить подмножества $\Pi_i \subseteq \Pi$, $i = \overline{1, m}$, которые обеспечивают максимальное значение показателя $Q(G)$ эффективности синтезируемой ИПС.

Представим согласованный показатель эффективности синтезируемой ИПС в следующем виде:

$$Q(G) = \sum_{R_k \in \Omega_k} P(R_k) \frac{\tilde{J}_k(\pi_j)}{\tilde{c}_k(\pi_j)}, \quad (2)$$

где $\tilde{J}_k(\pi_j)$ и $\tilde{c}_k(\pi_j)$ — нормированные на подмножестве $\Pi_k \subseteq \Pi$ значения полезности информации и стоимости ее получения путем проверки признака $\pi_j \in \Pi_k$; $P(R_k)$ — вероятность ИС R_k , определяемая по формуле

$$P(R_k) = \sum_{S_i \in R_k} P(S_i). \quad (3)$$

Отношение

$$\frac{\tilde{J}_k(\pi_j)}{\tilde{c}_k(\pi_j)} = \tilde{Q}_k(\pi_j) \quad (4)$$

показывает эффективность проверки признака $\pi_j \in \Pi_k$ в ИС $R_k \in \Omega_k$.

Для любой R_k -подсистемы, начинающейся с проверки признака π_j , выражение (2) с учетом соотношения (4) примет вид

$$Q_k(\pi_j) = \sum_{R_k \in \hat{\Omega}_k} P(R_k) \tilde{Q}_k(\pi_j), \quad (5)$$

где $\hat{\Omega}_k \subseteq \Omega_k$ — подмножество неконечных ИС данной R_k -подсистемы.

Переход из одного ИС в другое осуществляется с помощью проверки $\hat{\pi}_j \in \hat{\Pi}$. Проверка $\hat{\pi}_j \in \hat{\Pi}_k$, выполняемая в ИС R_k , имеет ω_{kj} возможных исходов и делит это состояние на новые ИС согласно отображению

$$\hat{\pi}_j : R_k \rightarrow R_{kj}^v, \text{ если } \pi_j^v : v = \overline{1, \omega_{kj}}, \quad (6)$$

где R_{kj}^v — новое ИС, получаемое в результате v -го исхода проверки.

Последовательно выполняя ряд проверок, получаем искомое конечное ИС $R_i, i = \overline{1, m}$.

В соответствии с принципом динамического программирования [3] можем найти значение показателя $Q_k(\pi_j)$ для всех ИС R_k , используя многошаговую процедуру.

На первом шаге рассмотрим ИС, содержащие два элемента, на втором — три, и так далее — вплоть до ИС, содержащих m элементов. Для сокращения вычислений преобразуем выражение (5) в форму рекуррентного соотношения. Обозначим первый проверяемый признак как π_s и выделим соответствующее ему значение показателя эффективности в виде отдельного слагаемого. В результате получим

$$Q_k(\pi_s) = P(R_k) \tilde{Q}_k(\pi_s) + \sum_{v=1}^{\omega_{ks}} P_k(\pi_s^v) \sum_{R_{ks}^v \in \hat{\Omega}_{ks}^v} P(R_{ks}^v) \tilde{Q}_{ks}^v(\pi_j), \pi_j \in \Pi_{ks}^v, \quad (7)$$

где R_{ks}^v — ИС, получаемое из исходного ИС R_k в результате v -го исхода проверки признака $\pi_s \in \Pi_k$ согласно условию (6); $\hat{\Omega}_{ks}^v$ — подмножество неконечных ИС R_{ks}^v -подпрограммы; $P(R_{ks}^v)$ — вероятность ИС R_{ks}^v , вычисляемая по формуле (3); Π_{ks}^v — подмножество признаков, допустимых для проверки в ИС R_{ks}^v ; $\tilde{Q}_{ks}^v(\pi_j)$ — эффективность проверки признака $\pi_j \in \Pi_{ks}^v$ в ИС R_{ks}^v ; $P_k(\pi_s^v)$ — вероятность v -го исхода проверки $\hat{\pi}_s$ в ИС $R_k \in \hat{\Omega}_k$, определяемая по формуле

$$P_k(\pi_s^v) = \frac{P(R_{ks}^v)}{P(R_k)} = \frac{\sum_{S_i \in R_{ks}^v} P(S_i)}{\sum_{S_i \in R_k} P(S_i)}. \quad (8)$$

Введем обозначение

$$Q_{ks}^v(\pi_j) = \sum_{R_{ks}^v \in \hat{\Omega}_{ks}^v} P(R_{ks}^v) \tilde{Q}_{ks}^v(\pi_j). \quad (9)$$

Это выражение, как видно из сопоставления его с формулой (5), дает оценку эффективности R_{ks}^v -подпрограммы, начинающейся с проверки признака π_j . Подставив его в формулу (7), получим искомое рекуррентное соотношение

$$Q_k(\pi_s) = P(R_k) \tilde{Q}_k(\pi_s) + \sum_{v=1}^{\omega_{ks}} P_k(\pi_s^v) Q_{ks}^v(\pi_j), \quad (10)$$

в соответствии с которым вычисляются оценки показателя $Q_k(\pi_s)$ для каждого признака $\pi_s \in \Pi_k$. При этом на каждом шаге вычислений используются результаты, полученные на предыдущих шагах в виде аналогичных оценок $Q_{ks}^v(\pi_j)$, выступающих в качестве рекуррентных добавок в соотношении (10). Если при v -м исходе проверки признака π_s в ИС $R_k \subseteq S$ получается конечное ИС $R_{ks}^v = R_i$ ($i: S_i \in R_k$), то $\hat{\Omega}_{ks}^v = \emptyset$ и, следовательно, $Q_{ks}^v(\pi_j) = 0$. В качестве оптимального в ИС R_k выбирается признак $\pi_j \in \Pi_k$, такой что

$$\pi_j = \arg \max_{\pi_s \in \Pi_k} \{Q_k(\pi_s)\}. \quad (11)$$

Если в некотором ИС допустим для проверки единственный признак (подмножество Π_k состоит из одного элемента), то эффективность его проверки $\tilde{Q}_k(\pi_j) = 1$. Это условие автоматически выполняется, если в качестве показателей информационной полезности и стоимости проверяемых признаков в формуле (4) принимаются их нормированные значения. Такое нормирование удобно и потому, что сглаживает отношение полезность/стоимость, а следовательно, снижает степень риска при выборе малополезного признака из-за относительно низкой цены его проверки, или, наоборот, при исключении полезного признака вследствие его низкой экономичности.

В работе [4] показано, что полезность информации, получаемой в результате выполнения в ИС $R_k \subseteq \hat{\Omega}_k$ проверки $\hat{\pi}_j \in \hat{\Pi}_k$, имеющей ω_{kj} возможных случайных исходов, определяется по формуле

$$J_k(\pi_j) = \sum_{v=1}^{\omega_{kj}} P_k(\pi_j^v) \left[\omega_{kj} \log_2 P(R_{kj}^v) - \log_2 \prod_{u=1}^{\omega_{kj}} P(R_{kj}^u) \right]. \quad (12)$$

В результате нормировки значений $J_k(\pi_j)$ на подмножестве $\Pi_k \subseteq \Pi$ допустимых признаков в ИС R_k получим

$$\tilde{J}_k(\pi_j) = \frac{J_k(\pi_j)}{\sum_{\pi_s \in \Pi_k} J_k(\pi_s)}, \quad \pi_j \in \Pi_k. \quad (13)$$

Аналогично производится нормировка стоимости $c(\pi_j)$ проверок признаков $\pi_j \in \Pi_k$:

$$\tilde{c}_k(\pi_j) = \frac{c(\pi_j)}{\sum_{\pi_s \in \Pi_k} c(\pi_s)}, \quad \pi_j \in \Pi_k. \quad (14)$$

Подставив значения $\tilde{J}_k(\pi_j)$ и $\tilde{c}_k(\pi_j)$ в формулу (4), получим оценку эффективности любого из признаков $\pi_j \in \Pi_k$, в частности конкретно рассматриваемого признака, обозначенного π_s . В свою очередь, подставив эту оценку в рекуррентное соотношение (10), вычислим значение согласованного показателя $Q_k(\pi_s)$ эффективности всей R_k -подсистемы, начинающейся с проверки признака π_s . Выполнив эти операции для всех признаков $\pi_s \in \Pi_k$, выберем из них оптимальный признак π_j согласно критерию (11). Если при этом ИС R_k содержит только два элемента S_i , то оно является единственным неконечным ИС в R_k -подпрограмме, а поэтому формула (5) принимает вид

$$Q_k(\pi_j) = \tilde{Q}_k(\pi_j). \quad (15)$$

Пример. Пусть заданы множества $S = \{S_i \mid i = \overline{1,6}\}$, $\Pi = \{\pi_j \mid j = \overline{1,5}\}$ и стоимость $c(\pi_j)$ проверки признаков (табл. 1). Также заданы ИС $R_k \subseteq S$ и соответствующие им допустимые признаки $\pi_j \in \Pi_k$ (табл. 2).

Таблица 1

S_i	π_j					$P(S_i)$
	π_1	π_2	π_3	π_4	π_5	
S_0	1	1	1	1	1	0,50
S_1	1	2	1	2	1	0,09
S_2	2	2	1	1	2	0,06
S_3	2	1	1	3	2	0,12
S_4	2	2	2	3	1	0,15
S_5	1	3	2	2	2	0,08
$c(\pi_j)$, усл.ед.	5,6	4,5	1,5	8,3	1,2	

Таблица 2

Информационные состояния $R_k \subseteq S$	Допустимые признаки $\pi_j \in \Pi_k$	Оптимизируемый показатель					
		$J(G)$		$\bar{c}(G)$		$Q(G)$	
		Оптимальный признак	$J(\pi_j / R_k)$	Оптимальный признак	$c_k(\pi_j)$	Оптимальный признак	$Q_k^{(m)}(\pi_j)$
1	2	3	4	5	6	7	8
$R_6 = \{S_0, S_1\}$	π_2, π_4	π_2	1,7192	π_2	4,5	π_2	1,4221
$R_7 = \{S_0, S_2\}$	π_1, π_2, π_5	π_5	2,4034	π_5	1,2	π_5	3,1384
$R_8 = \{S_0, S_3\}$	π_1, π_4, π_5	π_5	1,2619	π_5	1,2	π_5	4,1925
$R_9 = \{S_1, S_2\}$	π_1, π_4, π_5	π_5	0,117	π_5	1,2	π_5	4,1944
$R_{10} = \{S_1, S_4\}$	π_1, π_3, π_4	π_3	0,1842	π_3	1,5	π_3	3,4222
$R_{11} = \{S_1, S_5\}$	π_2, π_3, π_5	π_5	0,01	π_5	1,2	π_5	1,9994
$R_{12} = \{S_2, S_3\}$	π_2, π_4	π_2	0,3333	π_2	4,5	π_2	1,4221
$R_{13} = \{S_2, S_4\}$	π_3, π_4, π_5	π_5	0,5665	π_5	1,2	π_5	3,0556
$R_{14} = \{S_3, S_4\}$	π_2, π_3, π_5	π_5	0,0358	π_5	1,2	π_5	1,9994
$R_{15} = \{S_4, S_5\}$	$\pi_1, \pi_2, \pi_4, \pi_5$	π_5	0,276	π_5	1,2	π_5	4,0850
$R_{16} = \{S_0, S_1, S_4\}$	$\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4$	π_4	2,252	π_2	4,9865	π_3	4,2664
$R_{17} = \{S_0, S_1, S_5\}$	$\pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5$	π_5	2,1943	π_2	4,5	π_5	4,6567
$R_{18} = \{S_1, S_2, S_4\}$	$\pi_1, \pi_3, \pi_4, \pi_5$	π_5	1,2	π_3	2,1	π_5	9,9810
$R_{19} = \{S_2, S_3, S_4\}$	$\pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5$	π_4	1,3809	π_5	3,6545	π_4	3,1999
$R_{20} = \{S_2, S_3, S_5\}$	$\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4$	π_3	0,45	π_2	4,5	π_3	4,7020
$R_{21} = \{S_0, S_1, S_2, S_3\}$	$\pi_1, \pi_2, \pi_4, \pi_5$	π_4	1,2497	π_5	5,7	π_2	5,1041
$R_{22} = \{S_0, S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\}$	$\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5$	π_3	2,3499	π_5	5,96	π_2	7,6316

Составим гибкую оптимальную программу диагностирования на основе принципа согласованного оптимума.

1. Так как подмножества $R_k \subseteq S$ и $\Pi_k \subseteq \Pi$ заданы, то решение начнем со второго этапа, на котором для каждого ИС $R_k \subseteq S$ найдем соответствующие оптимальные признаки.

На *шаге 1* в соответствии с методом динамического программирования найдем оптимальные признаки для состояний R_6, \dots, R_{15} , содержащих по два элемента $S_i \in S$. Состоянию $R_6 = \{S_0, S_1\}$ соответствует множество допустимых проверок признаков $\Pi_6 = \{\pi_2, \pi_4\}$.

Проверка $\hat{\pi}_2$ имеет два исхода и, следовательно, делит подмножество R_6 на два конечных ИС $R_0 = \{S_0\}$ и $R_1 = \{S_1\}$:

$$\hat{\pi}_2 : R_6 \rightarrow \begin{cases} R_0 = \{S_0\}, & \text{если } s_{i2} = 1; \\ R_1 = \{S_1\}, & \text{если } s_{i2} = 2. \end{cases}$$

По формуле (12) вычислим показатель полезности информации при проверке признака π_2 :

$$\begin{aligned} J_6(\pi_2) &= \frac{P(R_0)}{P(R_6)}(2 \log_2 P(R_0) - \log_2 [P(R_0)P(R_1)]) + \frac{P(R_1)}{P(R_6)}(2 \log_2 P(R_1) - \log_2 [P(R_0)P(R_1)]) = \\ &= \frac{0,5}{(0,5+0,09)}(2 \log_2 0,5 - \log_2 (0,5 \cdot 0,09)) + \frac{0,09}{(0,5+0,09)}(2 \log_2 0,09 - \log_2 (0,5 \cdot 0,09)) = 1,7192. \end{aligned}$$

В ИС R_6 проверки признаков π_2 и π_4 одинаково полезны, следовательно, $J_6(\pi_2) = J_6(\pi_4) = 1,7192$.

Вычислим нормированные значения $\tilde{J}_6(\pi_2)$, $\tilde{J}_6(\pi_4)$ по формуле (13):

$$\tilde{J}_6(\pi_2) = \frac{J_6(\pi_2)}{J_6(\pi_2) + J_6(\pi_4)} = \frac{1,7192}{1,7192 + 1,7192} = 0,5, \quad \tilde{J}_6(\pi_4) = 0,5.$$

Затраты на выполнение проверок признаков π_2 и π_4 имеют следующие значения: $c(\pi_2) = 4,5$ и $c(\pi_4) = 8,3$. Вычислим нормированные значения $\tilde{c}_6(\pi_2)$, $\tilde{c}_6(\pi_4)$ по формуле (14):

$$\tilde{c}_6(\pi_2) = \frac{c(\pi_2)}{c(\pi_2) + c(\pi_4)} = \frac{4,5}{4,5 + 8,3} = 0,3516, \quad \tilde{c}_6(\pi_4) = \frac{c(\pi_4)}{c(\pi_2) + c(\pi_4)} = \frac{8,3}{4,5 + 8,3} = 0,6484.$$

Определим значение показателя согласованного оптимума по формуле (4):

$$Q_6(\pi_2) = \frac{\tilde{J}_6(\pi_2)}{\tilde{c}_6(\pi_2)} = \frac{0,5}{0,3516} = 1,4221; \quad Q_6(\pi_4) = \frac{\tilde{J}_6(\pi_4)}{\tilde{c}_6(\pi_4)} = \frac{0,5}{0,6484} = 0,7711.$$

Так как ИС R_6 — единственное неконечное ИС в R_6 -подпрограмме, то согласно формуле (15) $Q_6(\pi_2) = \tilde{Q}_6(\pi_2)$ и $Q_6(\pi_4) = \tilde{Q}_6(\pi_4)$.

По правилу (11) в качестве оптимального в ИС R_6 выберем признак π_2 , так как его показатель согласованного оптимума наибольший по сравнению с показателем π_4 . Таким же образом найдем оптимальные признаки в состояниях R_7, R_8, \dots, R_{15} . Найденные оптимальные признаки и их показатели $Q_k(\pi_j)$ занесем в 7-ю и 8-ю графы табл. 2.

На шаге 2 найдем оптимальные признаки в ИС R_{16}, \dots, R_{20} , содержащих по три элемента $S_i \in S$. Выберем оптимальный признак в ИС $R_{16} = \{S_0, S_1, S_4\}$ из подмножества допустимых признаков $\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4$.

Проверка $\hat{\pi}_1$ имеет два исхода и делит подмножество R_{16} на два ИС $R_6 = \{S_0, S_1\}$ и $R_4 = \{S_4\}$ согласно отображению

$$\hat{\pi}_1 : R_{16} \rightarrow \begin{cases} R_6 = \{S_0, S_1\}, & \text{если } s_{i1} = 1; \\ R_4 = \{S_4\}, & \text{если } s_{i1} = 2. \end{cases}$$

Вычислим ее полезность по формуле (12):

$$J_{16}(\pi_1) = \frac{P(R_6)}{P(R_{16})} (2 \log_2 P(R_6) - \log_2 [P(R_6)P(R_4)]) + \\ + \frac{P(R_4)}{P(R_{16})} (2 \log_2 P(R_4) - \log_2 [P(R_6)P(R_4)]) = 1,1748.$$

Аналогично получим

$$J_{16}(\pi_2) = 0,372; J_{16}(\pi_3) = 1,1748; J_{16}(\pi_4) = 2,252.$$

Вычислим нормированные значения показателей полезности $\tilde{J}_{16}(\pi_1)$, $\tilde{J}_{16}(\pi_2)$, $\tilde{J}_{16}(\pi_3)$, $\tilde{J}_{16}(\pi_4)$ по формуле (13):

$$\tilde{J}_{16}(\pi_1) = \frac{J_{16}(\pi_1)}{\sum_{\pi_s \in \Pi_{16}} J_{16}(\pi_s)} = \frac{1,1748}{1,1748 + 0,372 + 1,1748 + 2,252} = 0,2362; \\ \tilde{J}_{16}(\pi_2) = 0,0748; \tilde{J}_{16}(\pi_3) = 0,2362; \tilde{J}_{16}(\pi_4) = 0,4528.$$

Затраты на выполнение проверок признаков π_1 , π_2 , π_3 и π_4 имеют следующие значения: $c(\pi_1) = 5,6$, $c(\pi_2) = 4,5$, $c(\pi_3) = 1,5$ и $c(\pi_4) = 8,3$. Вычислим их нормированные значения:

$$\tilde{c}_{16}(\pi_1) = \frac{c_{16}(\pi_1)}{\sum_{\pi_s \in \Pi_{16}} c_{16}(\pi_s)} = \frac{5,6}{5,6 + 4,5 + 1,5 + 8,3} = 0,2814; \\ \tilde{c}_{16}(\pi_2) = 0,2261; \tilde{c}_{16}(\pi_3) = 0,0754; \tilde{c}_{16}(\pi_4) = 0,4171.$$

Для каждой допустимой проверки с учетом рекуррентных добавок, полученных на предыдущем шаге, вычислим показатель согласованного оптимума по формуле (10):

$$Q_{16}(\pi_1) = \frac{\tilde{J}_{16}(\pi_1)}{\tilde{c}_{16}(\pi_1)} + P_{16}(\hat{\pi}_1^1) Q_6(\pi_2) = \frac{0,2362}{0,2814} + \frac{0,59}{0,74} 1,4221 = 1,9732.$$

Аналогично вычислим показатели $Q_{16}(\pi_j)$ проверок признаков π_2 , π_3 , π_4 в ИС R_{16} :

$$Q_{16}(\pi_2) = 1,4406; Q_{16}(\pi_3) = 4,2664; Q_{16}(\pi_4) = 1,0856.$$

В качестве оптимального выберем признак π_3 , так как его показатель согласованного оптимума наибольший. Таким же способом найдем оптимальные проверки в состояниях R_{17}, \dots, R_{20} . Найденные признаки и их показатели согласованного оптимума занесем в соответствующие строки и графы табл. 2. В этой же таблице приведены для сравнения результаты вычислений при синтезе программ диагностирования по критериям максимума полезности информации и минимума средних затрат (графы 4—7).

Аналогично выбираются оптимальные признаки в ИС R_{21}, R_{22} , причем на каждом шаге выбора рекуррентно используются результаты, полученные на предшествующих шагах.

Значение $Q_{22}(\pi_2) = 7,6316$, соответствующее выбранному на последнем шаге оптимальному в ИС R_{22} признаку π_2 , дает показатель согласованного оптимума искомой ИПС в целом.

2. По данным вычислений, сведенных в табл. 2, построим искомую ИПС в виде графа-дерева (рис. 1).

3. Проверим правильность составленной ИПС.

Для этого вычислим по формуле (2) с учетом выражения (4) показатель согласованного оптимума составленной ИПС $Q(G)$ и сравним с ранее вычисленным значением $Q_{22}(\pi_2)$:

$$Q(G) = P(R_{22})\tilde{Q}_{22}(\pi_2) + P(R_8)\tilde{Q}_8(\pi_5) + P(R_{18})\tilde{Q}_{18}(\pi_5) + P(R_{10})\tilde{Q}_{10}(\pi_3) = \\ = 1 \cdot 2,0380 + 0,62 \cdot 4,1925 + 0,3 \cdot 7,2434 + 0,24 \cdot 3,4220 = 7,6316.$$

Как видим, $Q(G) = Q_{22}(\pi_2)$, следовательно, ИПС составлена правильно.

4. Оценим средние затраты и полезность составленной поисковой системы, используя известную методику [2]:

$$\bar{C}(G) = 6,064; \bar{J}(G) = 3,5365.$$

Вычисленные показатели составленной ИПС и поисковых систем, синтезированных по критериям максимума полезности информации (рис. 2) и минимума средних затрат (рис. 3), приведены в табл. 3.

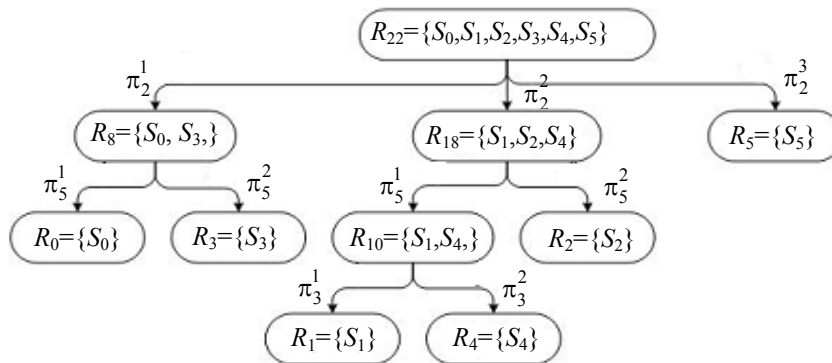


Рис. 1

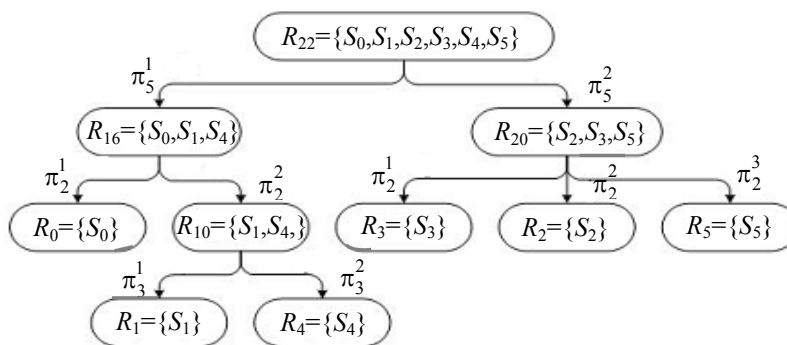


Рис. 2

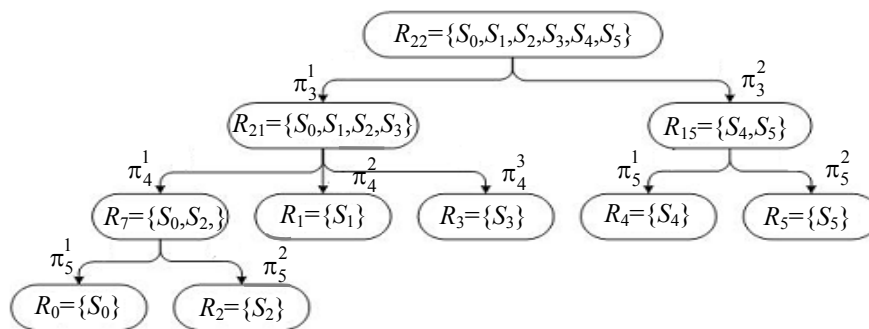


Рис. 3

Таблица 3

Критерий оптимизации	Значения показателей синтезированных программ		
	$Q(G)$	$J(G)$	$\bar{C}(G)$, усл. ед.
Согласованный оптимум	7,5697	3,5365	6,064
Максимум полезности информации	6,0278	4,5801	8,839
Минимум средних затрат	3,6737	1,1357	5,96

Сопоставив полученные результаты, видим, что ИПС, синтезированная по предлагаемому алгоритму, имеет несколько меньшее значение по показателю полезности информации,

чем ИПС, синтезированная по критерию максимума полезности, однако по затратам она практически сравнима с ИПС, синтезированной по минимуму средних затрат.

Таким образом, предложенный алгоритм наилучшим образом соответствует требованиям, предъявляемым к ценности информации и экономичности поисковой процедуры. Он применим как при двузначной, так и при многозначной форме представления диагностических признаков и легко может быть адаптирован к различным исходным данным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волгин Л. Н. Принцип согласованного оптимума. М.: Сов. радио, 1977.
2. Дмитриев А. К. Модели и методы анализа технического состояния бортовых систем. Учеб. пособие. СПб.: ВИКУ им. А. Ф. Можайского, 1999.
3. Беллман Р., Калаба Р. Динамическое программирование и современная теория управления / Пер. с англ.; Под ред. В. С. Разумихина. М.: Наука, 1969.
4. Дмитриев А. К., Копкин Е. В. Алгоритм семантического оценивания полезности информации в поисковых системах // *Авиакосмическое приборостроение*. 2003. № 6. С. 46—51.

Рекомендована кафедрой
автоматизации обработки и анализа
измерительной информации

Поступила в редакцию
06.04.07 г.

УДК 621.391.828

А. П. АЛЕШКИН

*Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского
Санкт-Петербург*

А. В. ГАВРИЛЕНКО, К. В. ИВАНОВ, В. П. КРАСНЫЙ, В. А. НОВИКОВ, А. И. ХОРУЖИЙ

*4-й Центральный НИИ МО РФ
Москва*

МЕТОД ОБРАБОТКИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МАЛОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА С УЧЕТОМ АПРИОРНЫХ ОГРАНИЧЕНИЙ

Рассматриваются вопросы использования построенного закона распределения случайной величины для обработки измеряемых радиолокатором характеристик малого космического аппарата с учетом априори известных ограничений на дисперсию ошибок траекторных измерений.

При создании и эксплуатации современной радиолокационной техники одними из важнейших этапов являются юстировка и калибровка. Для осуществления этих операций на практике применяются эталонные отражатели, в качестве которых используются малые космические аппараты (МКА) с заданными траекторными и радиолокационными характеристиками, позволяющими выполнять юстировку и калибровку РЛС с требуемыми показателями качества [1].

Для обработки измеряемых радиолокатором экспериментальных данных предлагается использовать закон распределения случайной величины, построенный с учетом априори известных ограничений на дисперсию ошибок траекторных измерений.

В теории обработки экспериментальных данных широкое применение нашли методы несмещенного оценивания, предусматривающие, как правило, обеспечение минимума дисперсии ошибок измерений.

Радиолокационные измерения являются случайной величиной x . Пусть данная случайная величина имеет закон распределения $P(x)$. Построим новый закон распределения $P'(x)$ и определим его следующим образом (рис. 1):

$$P'(x) = \begin{cases} \delta(x+a)c_a, & x \leq a; \\ P(x), & a < x < b; \\ \delta(x-b)c_b, & x \geq b, \end{cases}$$

где a, b, c_a, c_b — параметры закона распределения.

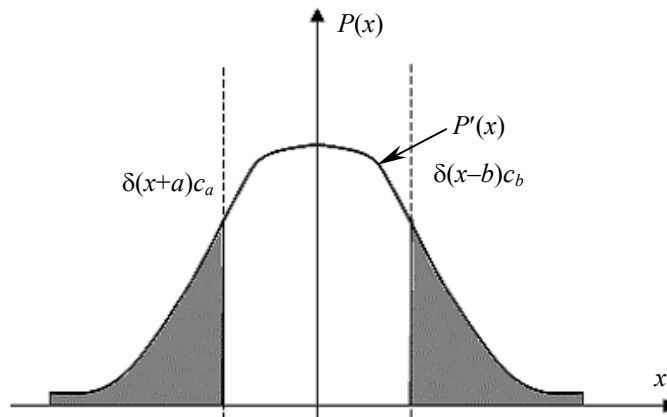


Рис. 1

Теорема. Закон распределения $P'(x)$ имеет несмещенные оценки относительно закона $P(x)$ в случае, если

$$c_a = \frac{1}{a} \int_{-\infty}^a xP(x)dx, \quad c_b = \frac{1}{b} \int_b^{\infty} xP(x)dx, \quad (1)$$

и для обеспечения меньшей дисперсии $D(P'(x)) < D(P(x))$ необходимо выполнение условий

$$\left. \begin{aligned} a \int_{-\infty}^a xP(x)dx &< \int_{-\infty}^a x^2 P(x)dx, \\ b \int_b^{\infty} xP(x)dx &< \int_b^{\infty} x^2 P(x)dx. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Доказательство. Запишем выражения для математического ожидания (первого начального момента) каждого из законов распределения [2] с учетом интервалов оценки случайной величины:

$$\left. \begin{aligned} M(P(x)) &= \int_{-\infty}^{\infty} xP(x)dx = \int_{-\infty}^a xP(x)dx + \int_a^b xP(x)dx + \int_b^{\infty} xP(x)dx, \\ M(P'(x)) &= \int_{-\infty}^{\infty} xP'(x)dx = \int_{-\infty}^a x\delta(x+a)c_a dx + \int_a^b xP(x)dx + \int_b^{\infty} x\delta(x-b)c_b dx. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Условие несмещенности оценки заключается в равенстве математических ожиданий

$$M(P(x)) = M(P'(x)). \quad (4)$$

Сравнивая выражения (3) с учетом равенства (4) и фильтрующего свойства δ -функции [3], получаем соотношения

$$\int_{-\infty}^a xP(x)dx = c_a \int_{-\infty}^a x\delta(x+a)dx = c_a a ,$$

$$\int_b^{\infty} xP(x)dx = c_b \int_b^{\infty} x\delta(x-b)dx = c_b b ,$$

откуда следуют выражения (1).

Дисперсию согласно работе [2] можно представить как

$$D(P(x)) = M((P(x))^2) - (M(P(x)))^2 .$$

Учитывая условие несмещенности (4), условие меньшей дисперсии $D(P'(x)) < D(P(x))$ может быть представлено через условие меньшего второго начального момента:

$$M((P'(x))^2) < M((P(x))^2) .$$

Запишем выражения для второго начального момента каждого из законов распределения с учетом интервалов оценки случайной величины:

$$M((P(x))^2) = \int_{-\infty}^{\infty} x^2 P(x)dx = \int_{-\infty}^a x^2 P(x)dx + \int_a^b x^2 P(x)dx + \int_b^{\infty} x^2 P(x)dx , \quad (5)$$

$$M((P'(x))^2) = \int_{-\infty}^a x^2 \delta(x+a)c_a dx + \int_a^b x^2 P(x)dx + \int_b^{\infty} x^2 \delta(x-b)c_b dx . \quad (6)$$

С учетом соотношений (1) выражение для второго начального момента закона $P'(x)$ (см. формулу (6)) может быть записано в следующем виде:

$$M((P'(x))^2) = c_a a^2 + \int_a^b x^2 P(x)dx + c_b b^2 = a \int_{-\infty}^a xP(x)dx + \int_a^b x^2 P(x)dx + b \int_b^{\infty} xP(x)dx . \quad (7)$$

Сравнивая выражения (5) и (7) для каждого из интервалов, с учетом гарантированного выполнения условий меньшей дисперсии $D(P'(x)) < D(P(x))$ имеем неравенства (2), что и требовалось доказать. ■

Пусть первые начальные моменты $\int_{-\infty}^a xP(x)dx < K$, $\int_b^{\infty} xP(x)dx < L$ ограничены и инте-

гралы $\int_{-\infty}^a x^2 P(x)dx < \infty$, $\int_b^{\infty} x^2 P(x)dx < \infty$ сходятся, тогда отношения

$$A = \int_{-\infty}^a x^2 P(x)dx \Big/ \int_{-\infty}^a xP(x)dx , \quad B = \int_b^{\infty} x^2 P(x)dx \Big/ \int_b^{\infty} xP(x)dx \quad (8)$$

квадратично взвешенной оценки к средневзвешенной существуют и конечны.

Для случайной величины с осесимметричной плотностью вероятности при знании точного значения математического ожидания и выполнении условий $a = -b$ и (8) справедливо равенство $A = -B$, т.е. накопленные взвешенные ошибки на концах распределения равны

и противоположны по знаку. Из данного свойства следует (рис. 2), что смещение оценки математического ожидания $m_{\text{изм}}$, сформированного по радиолокационным измерениям, относительно истинного математического ожидания $m_{\text{ист}}$ определяется согласно следующим соотношениям:

$$\begin{aligned} \text{если } m_{\text{изм}} > m_{\text{ист}}, \text{ то } |A_{\text{ист}}| < |B_{\text{изм}}|; \\ \text{если } m_{\text{изм}} < m_{\text{ист}}, \text{ то } |A_{\text{ист}}| > |B_{\text{изм}}|. \end{aligned}$$

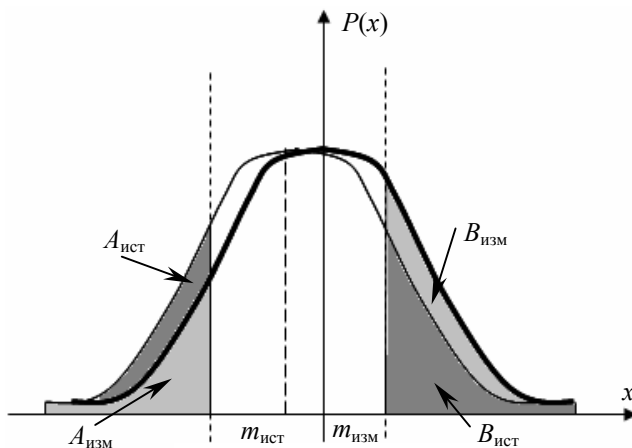


Рис. 2

На практике обработка данных радиолокационных измерений, подчиненных закону распределения $P(x)$, осуществляется исходя из известного значения дисперсии в соответствии со следующим выражением:

$$y_i = \begin{cases} x_c + \alpha\sigma, & \text{если } x_i > x_c + \alpha\sigma; \\ x_c - \alpha\sigma, & \text{если } x_i < x_c - \alpha\sigma; \\ \text{иначе } x_i, & \end{cases}$$

где y_i — величина, используемая в измерительной выборке вместо текущего измерения x_i ; x_c — прогнозируемое значение математического ожидания $m_{\text{ист}}$; $\alpha\sigma$ — пороговое значение, определяемое априорными знаниями среднеквадратического отклонения измерений, при превышении которого осуществляется замена x_i на y_i .

Данный способ обработки подобен так называемым „оконным“ способам, когда относительно заданного центра — координат эталонной орбиты МКА — производится стробирование измерений. Отличительной особенностью предлагаемого метода является возможность определения истинного центра распределения плотности вероятности радиолокационных измерений.

Измерения, полученные за пределами пороговых значений, в отличие от полученных „оконными“ методами, не отбрасываются, а с соответствующими весовыми коэффициентами включаются в обрабатываемую измерительную выборку. Это позволяет увеличить объем используемых при статистической обработке измерений, а следовательно, уменьшить дисперсию получаемых оценок.

Результаты математического моделирования показывают, что значительный выигрыш $\rho = D(P(x))/D(P'(x))$ при обработке измерений (рис. 3) достигается при $\alpha\sigma < 1,5\sigma$.

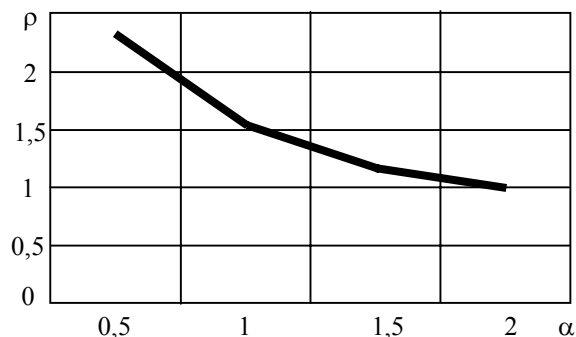


Рис. 3

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шпаков А. П., Гавриленко А. В., Тимошенко А. В. и др. Выбор оптимальной модели движения исследовательских малых космических аппаратов при решении задач юстировки радиолокационных средств // Изв. вузов. Приборостроение. 2007. Т. 50, № 6. С. 68—72.
2. Боровков А. А. Теория вероятностей. М.: Наука, 1976.
3. Бакут П. А., Большаков И. А. и др. Вопросы статистической теории радиолокации / Под ред. Г. П. Тартаковского. М.: Сов. радио, 1963. Т. 1.

Рекомендована кафедрой
антенно-фидерных устройств ВКА

Поступила в редакцию
09.02.07 г.

УДК 004.78:681.31

А. И. Долгов, Е. В. Ванюлин

Ростовский военный институт ракетных войск им. М. И. Неделина

МЕТОД ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ КОРРЕКЦИИ УСТРОЙСТВ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДАННЫХ С ВРЕМЕННОЙ ИЗБЫТОЧНОСТЬЮ

Рассматривается метод функциональной коррекции устройств преобразования данных с временной избыточностью, основанный на использовании динамического резерва, возникающего в процессе непосредственного функционирования объекта.

Нарушение процесса функционирования объекта при одних входных данных, как правило, не исключает правильного его функционирования при других данных. Этим обстоятельством обусловлено проявление некоторых резервных возможностей, представляющих собой своеобразный внутренний функциональный резерв, который можно назвать также динамическим резервом, так как он возникает в процессе непосредственного функционирования объекта. Использование этих резервных возможностей для коррекции функционирования объекта назовем функциональной коррекцией.

Метод функциональной коррекции заключается в повторном воспроизведении функции объекта при нарушении ее выполнения с целью получения адекватного результата путем целенаправленного изменения входных, а при необходимости и выходных данных. Под функцией, выполняемой объектом, в данном случае понимается операция, фрагмент вычислений и другие реализуемые аппаратно или программно действия, на выполнение которых отводится ограниченное время.

Идея функциональной коррекции применительно к частным случаям изложена в работах [1—4].

Метод коррекции одиночных ошибок запоминающего устройства [3], который в некоторых публикациях [5, 6] упоминался как метод Долгова, основан на преобразовании данных, представленных в двоичной системе счисления, с помощью инвертирования. Допустим, что в накопителе записано слово 11101011, в котором 8-й двоичный разряд (левый в записи приведенного слова) контрольный. При чтении получено слово 11100011. Проверка на четность показывает нарушение процесса функционирования запоминающего устройства (в данном случае — закрепление нуля в 4-м разряде). Инвертируем считанное слово в порядке входного преобразования (получается 00011100) и запишем его в ту же ячейку накопителя. При повторном чтении из этой ячейки (с учетом закрепления нуля в 4-м разряде) будет получено

слово 00010100. Последующее инвертирование в порядке выходного преобразования дает записанное в накопителе слово без ошибки. Как показано в работе [5], „... слово надо инвертировать по методу Долгова“, и тогда, например, „... код Хэмминга, предназначенный для исправления одной и обнаружения двух ошибок, может совместно с временной избыточностью исправлять две ошибки, а не одну“.

Рассмотрим метод функциональной коррекции применительно к электронным системам обработки данных.

Следует отметить, что функциональная коррекция базируется в основном не на аппаратной избыточности, а на временной, при этом в ранее изученных моделях комбинирования аппаратной и временной избыточности [7] не учитывались возможности функциональной коррекции.

Рассмотрим наиболее общую постановку задачи функциональной коррекции.

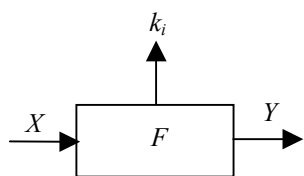


Рис. 1

На рис. 1 условно представлен элемент системы обработки данных, предназначенный для реализации функции $Y = F(X)$, где X — переменные входные данные элемента, Y — выходные данные, при этом допустимо представление данных в виде нескольких слов. Функцию F в дальнейшем будем называть функцией обработки.

При выполнении i -й операции формируется двоичный признак контроля k_i . Будем считать, что значение $k_i = 0$ соответствует правильному функционированию элемента ($Y = F(X)$), а значение $k_i = 1$ — нарушению функционирования ($Y \neq F(X)$).

На рис. 2 приведена схема элемента, реализующего функцию F с использованием процесса функциональной коррекции. Такой элемент, который далее называется „охваченным“ функциональной коррекцией, строится на основе базового элемента.

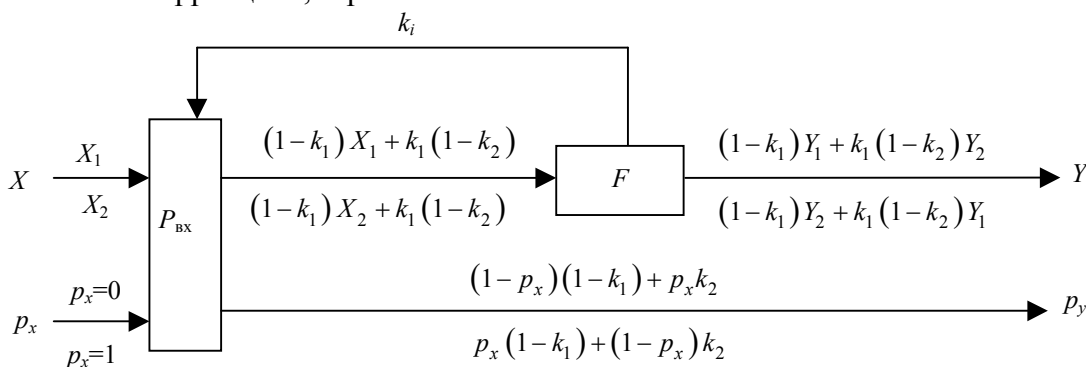


Рис. 2

Предусмотрено (см. рис. 2) представление входных данных X в одной из двух форм — основной (X_1) и резервной (X_2) — и соответствующее представление выходных данных Y также в основной (Y_1) и резервной (Y_2) формах (случаи коррекции, предусматривающие представление данных более, чем в двух формах, здесь не рассматриваются).

Для различения того, в какой именно форме представлены данные, в каждом из представлений используются двоичные признаки

$$p_x = \begin{cases} 0, & \text{если } X = X_1; \\ 1, & \text{если } X = X_2, \end{cases} \quad p_y = \begin{cases} 0, & \text{если } Y = Y_1; \\ 1, & \text{если } Y = Y_2. \end{cases}$$

Цепи хранения и обработки признаков представлений являются избыточными, вводимыми для осуществления функциональной коррекции. Избыточным также является блок приема входных данных, реализующий функцию $P_{вх}$, определяющую зависимость данных от значения k_i . При $k_i = 0$ входные данные выдаются блоком приема на вход базового элемента в

той форме, в которой они поступили, т.е. $P_{\text{вх}}(X_1) = X_1$ и $P_{\text{вх}}(X_2) = X_2$. В отличие от этого при $k_i=1$ реализуется функция взаимного преобразования форм представления, т.е. $P_{\text{вх}}(X_1) = X_2$ и $P_{\text{вх}}(X_2) = X_1$.

В начале очередного выполнения функции F элементом, „охваченным“ функциональной коррекцией, в любых случаях осуществляется основная реализация, когда данные без изменений поступают на входы базового элемента. По результатам основной реализации функции обработки в базовом элементе вырабатывается признак контроля k_i : при правильном функционировании $k_1=0$, при нарушении функционирования $k_1=1$. При $k_1=0$ выходные данные идентичны входным, т.е. в данном случае коррекции не потребовалось. Если же $k_1=1$, то осуществляется повторная реализация функции F , и блок $P_{\text{вх}}$ преобразует входные данные в другую форму представления. При этом выходные данные также представляются во второй форме, и вырабатывается признак контроля k_2 . При $k_2=0$ выполнение функции F завершается (в данном случае коррекция потребовалась), а при $k_2=1$ фиксируется неосуществимость коррекции.

В соответствии с приведенными исходными данными требуется: для определенной функции обработки F найти функцию входного преобразования $P_{\text{вх}}$ и функцию выходного преобразования $P_{\text{вых}}$, такие что $P_{\text{вых}}(F(P_{\text{вх}}(X_1))) = X_1$ и $P_{\text{вых}}(F(P_{\text{вх}}(X_2))) = X_2$.

Выполнение сформулированного требования обеспечивает (при необходимости) возможность взаимного преобразования форм представления полученного результата как для X , так и для Y . В качестве основной формы представления следует выбрать ту, которая будет единственной, если функциональная коррекция не потребуется.

Процесс функциональной коррекции может быть описан следующим образом:

$$Y = \begin{cases} Y_1 = F(X_1) \text{ и } p_y = 1, \text{ если } (1 - p_x)(1 - k_1) + p_x k_1(1 - k_2) = 1; \\ Y_2 = F(X_2) \text{ и } p_y = 0, \text{ если } p_x(1 - k_1) + (1 - p_x)k_1(1 - k_2) = 1. \end{cases}$$

Класс устройств обработки данных, в которых может успешно применяться функциональная коррекция, является довольно широким.

Учитывая, что в компьютерной технике одним из фундаментальных узлов является сумматор, так как на его основе строятся практически все другие узлы (вычитания, умножения, деления и т.д.), покажем, что на основе инвертирования можно осуществить функциональное резервирование n -разрядного двоичного сумматора, реализующего функцию

$$|X + Z + 0|_{2^n} = Y,$$

где X, Z и Y — соответственно слагаемые и сумма, 0 — значение переноса в младший разряд сумматора.

Обозначим через $X_{\text{и}}, Z_{\text{и}}$ и $Y_{\text{и}}$ инверсные значения соответствующих операндов (в резервной форме представления). Значение $X_{\text{и}}$ определяется из основной формы представления X путем инвертирования значений всех двоичных разрядов в слагаемом X , значения $Z_{\text{и}}$ и $Y_{\text{и}}$ формируются аналогичным образом; в традиционном аналитическом выражении:

$$\begin{aligned} X_{\text{и}} &= P_{\text{вх}}(X) = |2^n - X - 1|_{2^n}, & X &= P_{\text{вх}}(X_{\text{и}}) = |2^n - X_{\text{и}} - 1|_{2^n}; \\ Z_{\text{и}} &= P_{\text{вх}}(Z) = |2^n - Z - 1|_{2^n}, & Z &= P_{\text{вх}}(Z_{\text{и}}) = |2^n - Z_{\text{и}} - 1|_{2^n}; \\ Y_{\text{и}} &= P_{\text{вых}}(Y) = |2^n - Y - 1|_{2^n}, & Y &= P_{\text{вых}}(Y_{\text{и}}) = |2^n - Y_{\text{и}} - 1|_{2^n}. \end{aligned}$$

Рассмотрим значение суммы слагаемых и переноса в младший разряд сумматора, представленных за счет входного преобразования в инверсном виде:

$$\begin{aligned} |X_{\text{и}} + Z_{\text{и}} + 1|_{2^n} &= |P_{\text{вх}}(X) + P_{\text{вх}}(Z) + 1|_{2^n} = \left| (2^n - X - 1) + (2^n - Z - 1) + 1 \right|_{2^n} = \\ &= \left| 2^n + (X + Z) - 1 \right|_{2^n} = Y_{\text{и}}. \end{aligned}$$

Инвертируя полученный результат $Y_{\text{и}}$ в порядке выходного преобразования, переходим от резервной формы представления к основной:

$$P_{\text{вых}}(Y_{\text{и}}) = \left| 2^n - Y_{\text{и}} - 1 \right|_{2^n} = \left| 2^n - (2^n - (X + Z) - 1) - 1 \right|_{2^n} = |X + Z + 0|_{2^n} = Y.$$

Реализация метода функциональной коррекции, как правило, охватывающей весьма существенный круг характерных неисправностей функционирования элементов, достаточно проста. В связи с этим заслуживают внимания вопросы о ведомственной, государственной и международной стандартизации структурных и интерфейсных требований к компьютерным комплекующим. Положительный эффект стандартизации может проявиться, в первую очередь, при использовании недублированных систем и элементов обработки данных на подвижных объектах, а также при функционировании систем, работающих в жестком режиме с предусмотренным резервом времени.

Идея функциональной коррекции не ограничивается использованием ее лишь в электронных системах обработки данных. Основанная на получении адекватных результатов при обработке данных в разных формах их представления эта идея может быть реализована для объектов и их элементов различной природы (технических, механических, информационных и т.д.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А. с. 249767, СССР. Табличный сумматор вычетов с контролем операций / А. И. Долгов // Б. И. 1969.
2. А. с. 259479, СССР. Табличный сумматор вычетов / А. И. Долгов // Б. И. 1969.
3. А. с. 333605, СССР. Запоминающее устройство / А. И. Долгов // Б. И. 1971.
4. А. с. 1441396, СССР. Табличный сумматор вычетов / А. И. Долгов, В. А. Афанасьев // Б. И. 1988.
5. Корнейчук В. И., Орлова М. И., Рычагов Ю. Б. Структурные методы повышения надежности запоминающих устройств // Вестн. Киев. политехн. ин-та. Киев: КГУ — Вища школа, 1981. Вып. 18.
6. Корнейчук В. И., Орлова М. И., Забуравный А. Г. Об одном способе повышения надежности ЗУ // Управляющие системы и машины. 1984. № 6.
7. Креденцер Б. П. Прогнозирование надежности систем с временной избыточностью. Киев: Наукова думка, 1978.

Рекомендована Институтом

Поступила в редакцию
14.08.06 г.

З. З. БАГАУТДИНОВ, А. С. ГЕЙДА, И. В. ЛЫСЕНКО

Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОЦЕНИВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОМПЛЕКСА МЕРОПРИЯТИЙ НА ОСНОВЕ АЛГЕБРЫ НЕЧЕТКИХ ЧИСЕЛ

На основе разработанной алгебры нечетких чисел предлагается новый подход к моделированию и оцениванию эффективности комплекса мероприятий в условиях неопределенности. Рассмотрен упрощенный пример.

При планировании комплекса мероприятий (работ, технологических операций, целевых программ) требуется оценить его эффективность [1]. Под эффективностью комплекса мероприятий (КМ) понимают [2] его свойство, которое характеризует приспособленность комплекса мероприятий давать *требуемые* результаты в процессе его выполнения и/или по его завершении. Трудности при решении этой задачи возникают, если мероприятия реализуются в условиях неопределенности сведений о затратах материальных ресурсов и времени для выполнения КМ (затраты являются случайными величинами), а также в условиях неопределенности сведений о характеристиках среды, в которой будет осуществляться КМ. Такая неопределенность проявляется, например, при решении задач по обоснованию объемов необходимых ассигнований на разработку, производство и эксплуатацию отдельных образцов техники [3] или на реализацию целевых программ. В этих задачах присутствуют параметры, являющиеся случайными величинами, но возможные (в будущем) значения которых не могут быть охарактеризованы с помощью соответствующих функций распределения вероятностей. Причина заключается в следующем.

Важнейшим допущением, позволяющим использовать теоретико-вероятностные характеристики случайной величины для описания ее будущих значений, является утверждение: случайная величина будет изменяться так же, как она изменялась в прошлом (ведь все характеристики ее распределения получены по предыдущим реализациям). Но можно ли принять такое допущение о значении, например, коэффициента K_y^p удорожания работ вследствие будущих инфляционных процессов [3]? Видимо, нет. Таким образом, появляется необходимость отказаться от вероятностной меры и использовать „нечеткостную“ меру возможности будущих значений случайной величины — функцию принадлежности (ФП).

Случайная величина, охарактеризованная с помощью функции принадлежности, называется нечеткой [4], например, нечеткое число или нечеткая функция [5]. Нечеткое число задается экспертом в форме „функции принадлежности нечеткого числа“ множеству его возможных значений.

Обозначим: \tilde{a} — нечеткое число (НЧ), $O_{\tilde{a}}$ — область возможных значений числа \tilde{a} , $\mu_{\tilde{a}}$ — ФП числа \tilde{a} . Тогда

$$\forall a \in O_{\tilde{a}} \Rightarrow \mu_{\tilde{a}} : a \mapsto [0, 1], \mu_{\tilde{a}}(a) = \text{Poss}(\tilde{a} = a), O_{\tilde{a}} \subseteq R = (-\infty, +\infty).$$

Значение $\mu_{\tilde{a}}(a)$ — это субъективная мера* возможности того, что предикат $\tilde{a} = a$ примет значение „истина“.

*Так как эта мера задается экспертом, ее называют „субъективной“, в отличие от вероятности, считающейся „объективной“ мерой возможности.

Оценивание эффективности комплекса мероприятий осуществляется с помощью показателя его эффективности [2], под которым будем понимать меру $P_{д.ц}$ возможности наступления случайного события \hat{A} , заключающегося в *достижении цели* комплекса мероприятий за счет использования имеющихся материальных ресурсов и времени:

$$P_{д.ц} \stackrel{d}{=} \text{Poss}(\hat{A}); \hat{A} \stackrel{d}{=} (\tilde{e}_{<3>} \geq e_{<3>}^d); \tilde{e}_{<3>} \stackrel{d}{=} \langle \tilde{e}_1, \tilde{e}_2, \tilde{e}_3 \rangle; e_{<3>}^d \stackrel{d}{=} \langle e_1^d, e_2^d, e_3^d \rangle,$$

где $\tilde{e}_{<3>}$ — вектор *виртуальных эффектов** КМ (результативности \tilde{e}_1 , ресурсоемкости \tilde{e}_2 и оперативности \tilde{e}_3), $e_{<3>}^d$ — вектор *допустимых* значений соответствующих эффектов.

Для расчета значения $P_{д.ц}$ следует разработать графовые и функциональные модели КМ [6]. Рассмотрим упрощенную графовую модель КМ (рис. 1), включающую четыре мероприятия (обозначены кружками).

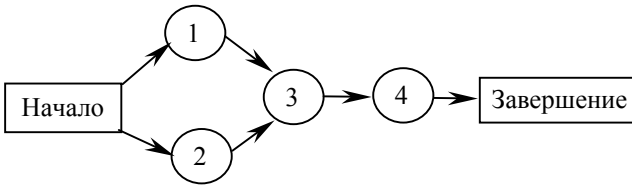


Рис. 1

Функциональные модели виртуальных эффектов и показателей результативности P_1 , ресурсоемкости P_2 и оперативности P_3 КМ запишем в алгебре нечетких чисел [5], являющейся *полем* нечетких чисел и, в соответствии с доказанностью перманентности арифметических действий, *расширением* поля действительных чисел:

$$\tilde{e}_1 \stackrel{d}{=} \tilde{v}, \tilde{e}_2 \stackrel{d}{=} \tilde{C} \stackrel{d}{=} \sum_{i=1}^4 \tilde{c}_i, \tilde{e}_3 \stackrel{d}{=} \tilde{T} \stackrel{d}{=} \tilde{\tau}_{1,2} + \tilde{\tau}_3 + \tilde{\tau}_4, \tilde{\tau}_{1,2} \stackrel{d}{=} \max\{\tilde{\tau}_1, \tilde{\tau}_2\};$$

$$P_1 \stackrel{d}{=} \text{Poss}(\hat{A}_1) \stackrel{d}{=} \text{Poss}(\tilde{v} \geq V^d) \stackrel{d}{=} M_{\tilde{v}}(V^d), \quad P_2 \stackrel{d}{=} \text{Poss}(\hat{A}_2) \stackrel{d}{=} \text{Poss}(\tilde{C} \leq C^d) \stackrel{d}{=} L_{\tilde{C}}(C^d),$$

$$P_3 \stackrel{d}{=} \text{Poss}(\hat{A}_3) \stackrel{d}{=} \text{Poss}(\tilde{T} \leq T^d) \stackrel{d}{=} L_{\tilde{T}}(T^d), \quad P_{д.ц} \stackrel{d}{=} \sum_{i=1}^3 \alpha_i P_i, \quad \sum_{i=1}^3 \alpha_i \stackrel{d}{=} 1.$$

Здесь \tilde{v} — целевой эффект КМ (например, объем производства к моменту завершения КМ, задается интегрально); \tilde{c}_i — затраты финансовых средств, а $\tilde{\tau}_i$ — затраты времени на выполнение i -го мероприятия, $i = \overline{1, 4}$; V^d , C^d и T^d — допустимые значения объема производства к моменту завершения КМ, затрат финансовых средств и затрат времени на реализацию КМ соответственно; α_i — коэффициент значимости i -го целевого показателя, $i = \overline{1, 3}$.

В таблице приведены характеристики НЧ при допустимых значениях $V^d=14$, $C^d=40$, $T^d=46$ и $\alpha_i=1/3$ для каждого показателя.

Характеристика НЧ	Обозначение НЧ								
	\tilde{c}_1	$\tilde{\tau}_1$	\tilde{c}_2	$\tilde{\tau}_2$	\tilde{c}_3	$\tilde{\tau}_3$	\tilde{c}_4	$\tilde{\tau}_4$	\tilde{v}
Минимально возможное значение	6	4	5	2	9	8	10	12	3
Наиболее возможное значение	13	8	9	6	15	12	14	16	11
Максимально возможное значение	15	14	10	15	17	20	15	24	17

*Эти эффекты являются случайными величинами, описываемыми с помощью соответствующих ФП, т.е. нечеткими, что обозначено тильдой.

Функции принадлежности $\mu_{\tilde{a}}$ для \tilde{v} , \tilde{c}_i и $\tilde{\tau}_i$, $i = \overline{1, 4}$, заданы в следующем виде [5]:

$$\mu_{\tilde{a}}(a) = \left[(a - a') / (a^* - a') \right]^{4(a^* - a') / (a'' - a')} \left[(a'' - a) / (a'' - a^*) \right]^{4(a'' - a^*) / (a'' - a')}, \text{ если } a \in O_{\tilde{a}};$$

$$\mu_{\tilde{a}}(a) = 0, \text{ если } a \notin O_{\tilde{a}}.$$

Графики ФП $\mu_{\tilde{\tau}_1}$, $\mu_{\tilde{v}}$ и $\mu_{\tilde{c}_1}$ показаны на рис. 2.

При указанных исходных данных ($V^D=14$ и при изменении значений C^D и T^D) величина $P_{д.ц}=0,63$ (см. рис. 3). Кривые на рис. 3 — это линии постоянных значений $P_{д.ц}$.

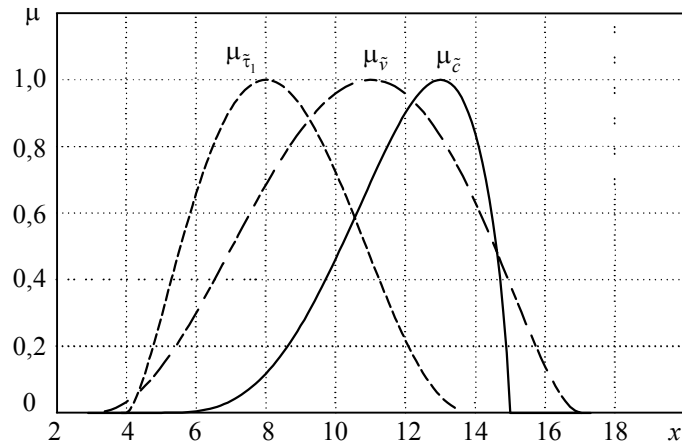


Рис. 2

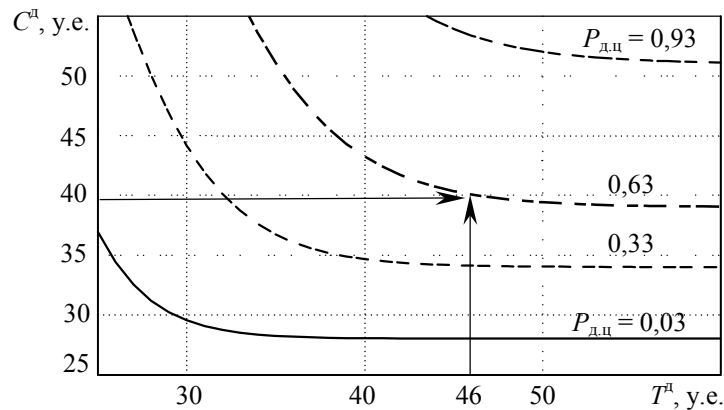


Рис. 3

Предложенный подход к моделированию и оцениванию эффективности комплекса мероприятий в рамках разработанной алгебры нечетких чисел позволяет получить оценку показателя эффективности КМ в случае отсутствия и/или ненадежности соответствующих статистик, а также корректно сформулировать и решить задачи анализа и синтеза КМ.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 07 08 00810 а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Постановление Правительства Российской Федерации от 26.06.1995 г. № 594 (ред. от 14.12.2006 г.): О реализации федерального закона „О поставках продукции для федеральных государственных нужд“.
2. Петухов Г. Б., Якунин В. И. Методологические основы внешнего проектирования целенаправленных процессов и целеустремленных систем. М.: АСТ, 2006. 504 с.
3. Методы военно-экономических исследований перспектив развития космических средств / Под ред. Е. В. Рыжова. М.: Машиностроение, 1998. 152 с.

4. Zadeh L. A. Fuzzy sets// Information and Control. 1965. N 8. P. 338—353.
5. Лысенко И. В. Нечеткая оптимизация: новый подход к постановке и решению задач // Тр. СПИИРАН. Т. 1, вып. 2. СПб.: Наука, 2004. С. 90—118.
6. Лысенко И. В. Оценка эффективности функционирования человекомашинных систем: вероятностный подход // Тр. СПИИРАН. Т. 1, вып. 1. СПб.: Наука, 2002. С. 49—64.

Рекомендована Институтом

Поступила в редакцию
06.09.07 г.

ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

УДК 62.50

А. Л. БОЧКОВ, Н. А. ДУДАРЕНКО, А. В. УШАКОВ

*Санкт-Петербургский государственный университет
информационных технологий, механики и оптики*

СИНТЕЗ МНОГОМЕРНЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНО ВЫРОЖДЕННЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Рассматриваются проблемы, связанные с синтезом функционально вырожденных систем, которые возникают во многоагрегатных технических средах типа многомерный вход — многомерный выход в режимах „синхронного“ движения.

В современной технологической практике имеют место многоагрегатные технические процессы, в которых агрегаты участвуют в формировании совокупного продукта и функционируют как „единое целое“. Примерами таких процессов являются: процессы формирования и подачи ленточного материала в листопрокатном производстве, в производстве бумаги и тканей, процессы динамической юстировки многокомпонентных оптических и радиооптических систем, процессы движения „строем“ подвижных технических средств и антропокомпонентов (строй самолетов, автомобилей и т.п.).

С точки зрения модельной концепции „вырождение систем типа многомерный вход — многомерный выход (МВМВ)“ [1, 2] перечисленные технические процессы являются „функционально“ вырожденными, при этом одной из задач средств управления, обслуживающих эти процессы, является поддержание „функционального“ вырождения, именуемого также согласованным управлением [3—6].

Постановка задачи синтеза управления многоагрегатным техническим объектом (ТО) МВМВ, доставляющего процессам, фиксируемым на выходе объекта, функциональное вырождение, формулируется на основе использования модельного векторно-матричного представления

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t), \quad y(t) = Cx(t), \quad (1)$$

где u, x, y — соответственно векторы управления, состояния и выхода ТО, $u, y \in R^m$, $x \in R^n$; A, B, C — соответственно матрицы состояния, управления и выхода, согласованные по размерности с переменными объекта.

Задача функционально вырожденного поведения ТО (1) принимает вид

$$g(t) = \psi(t)g_0 \Rightarrow g(s) = \psi(s)g_0; \quad y(t) \in L_c \{g_0\} \text{ для } \forall t, \quad (2)$$

где $g(t), g_0, \psi(t), \psi(s)$ — задающее входное воздействие, фиксированный вектор в пространстве входов, скалярные функции соответственно времени t и комплексной переменной s ,

задающие динамику желаемого развития процессов в ТО; $L_c \{g_0\}$ — линейная оболочка, натянутая на вектор g_0 .

Поиск решения задачи осуществляется в классе алгоритмов неадаптивного управления вида

$$u(t) = K_g g(t) - Kx(t), \quad (3)$$

где K_g, K — соответственно матрицы прямой связи по задающему воздействию и отрицательной обратной связи по состоянию ТО.

Агрегирование модели объекта (1) и алгоритма управления (3) образует систему

$$\dot{x}(t) = Fx(t) + Gg(t); \quad x(0); \quad y(t) = Cx(t), \quad (4)$$

здесь $F = A - BK$, $G = BK_g$.

Перейдем в системе уравнений (4) к лапласовым образам, тогда получим

$$y(s) = C(sI - F)^{-1}x(0) + C(sI - F)^{-1}Gg(s)|_{x(0)=0} = (sI - F)^{-1}Gg(s); \quad x(0) = x(t)|_{t=0}, \quad (5)$$

где I — единичная матрица.

Подстановка в выражение (5) условия (2) дает

$$y(s) = C(sI - F)^{-1}Gg(s)|_{g(s)=\psi(s)g_0} = C(sI - F)^{-1}G\psi(s)g_0. \quad (6)$$

Поставим задачу сведения представления $y(s)$ в форме (6) к виду

$$y(s) = C(sI - F)^{-1}G\psi(s)g_0 = \zeta(s)g_0, \quad (7)$$

где $\zeta(s)$ — скалярный лапласов образ, определяющий динамику изменения вектора $y(s)$ выхода ТО (1) средствами алгоритма управления (3) в линейной оболочке $L_c \{g_0\}$.

Основной результат, состоящий в конструировании матриц K_g, K алгоритма (3), опирается на следующие утверждения.

Утверждение 1. Для того чтобы вектор $y(t) \in L_c \{g_0\}$ или чтобы выполнялось соотношение $y(s) = \zeta(s)g_0$, где $\zeta(s)$ — скалярная функция переменной s , имеющая вещественнозначное обратное преобразование Лапласа, достаточно, чтобы:

1) вектор $BK_g g_0$ был правым собственным вектором матрицы состояния F , т.е. выполнялось соотношение

$$F(BK_g g_0) = \lambda_i(BK_g g_0), \quad (8)$$

где λ_i — одно из собственных значений матрицы F , $i = \overline{1, n}$;

2) вектор g_0 был правым собственным вектором матрицы CBK_g , т.е. выполнялось равенство

$$(CBK_g)g_0 = \lambda_{gl}g_0, \quad (9)$$

где λ_{gl} — одно из собственных значений матрицы CBK_g , $l = \overline{1, m}$.

Доказательство. Рассмотрим векторно-матричное выражение

$$y(s) = C(sI - F)^{-1}G\psi(s)g_0 = C(sI - F)^{-1}BK_g g_0\psi(s).$$

Согласно свойству [4] матричной функции $f(F)$ сохранять геометрический спектр исходной матрицы F ($F\xi_i = \lambda_i\xi_i$, где $\lambda_i: \det(\lambda I - F) = 0$) в форме

$$f(F)\xi_i = f(\lambda_i)\xi_i \quad (10)$$

выражения (8) и (10) позволяют записать для $f(F) = (sI - F)^{-1}$ соотношение

$$(sI - F)^{-1}BK_g g_0 = (s - \lambda_i)^{-1}BK_g g_0, \quad (11)$$

подстановка которого в формулу (7) дает

$$y(s) = CBK_g g_0 \psi(s) (s - \lambda_i)^{-1}. \quad (12)$$

Если в выражении (12) учесть равенство (9), то получим

$$y(s) = \lambda_{gi} \psi(s) (s - \lambda_i)^{-1} g_0 = \zeta(s) g_0, \quad \zeta(s) = \lambda_{gi} \psi(s) (s - \lambda_i)^{-1}. \quad \blacksquare$$

Заметим, что собственные числа λ_i выбираются исходя из требований к динамике развития фиксируемых на выходе процессов в подпространстве $L_c \{g_0\}$.

Альтернативой полученному результату являются следующие положения.

Утверждение 2. Для того чтобы вектор $y(t) \in L_c \{g_0\}$ или чтобы выполнялось соотношение $y(s) = \zeta(s) g_0$, где $\zeta(s)$ — скалярная функция переменной s , имеющая вещественно-значное обратное преобразование Лапласа, достаточно, чтобы:

- 1) вектор $BK_g g_0$ удовлетворял соотношению (8), а следовательно, (11);
- 2) матрица CBK_g была единичной, т.е.

$$CBK_g = I. \quad (13)$$

Доказательство. На основании подстановки соотношения (11) в формулу (7) получим выражение

$$y(s) = CBK_g g_0 \psi(s) (s - \lambda_i)^{-1},$$

тогда с учетом (13)

$$y(s) = g_0 (s - \lambda_i)^{-1} \psi(s) = (s - \lambda_i)^{-1} \psi(s) g_0 = \zeta(s) g_0,$$

где $\zeta(s) = (s - \lambda_i)^{-1} \psi(s)$. ■

Таким образом, матрицы C и B (при конструировании объекта управления) и матрица K_g (при синтезе закона управления) должны формироваться из условия

$$(C, B, K_g) = \arg \{CBK_g = I\}.$$

Собственные числа λ_i , как и для утверждения 1, выбираются исходя из требований к динамике развития процессов в подпространстве $L_c \{g_0\}$.

Утверждение 3. Матрица M , приводящая произвольную $(n \times n)$ квадратную матрицу F простой структуры к диагональной форме Λ в силу соотношения

$$\Lambda = M^{-1} F M,$$

имеет своими столбцами [7] собственные векторы матрицы F . ■

Положения утверждений 1—3, дополненные результатами, полученными при разработке обобщенного модального управления [8], являются алгоритмической основой для синтеза управления, доставляющего системе МВМВ функциональную вырожденность.

Рассмотрим алгоритм формирования матричных компонентов закона управления (3).

1. Задать вектор g_0 , определяющий линейную оболочку $L_c \{g_0\}$, которой в процессе функционирования ОУ должен принадлежать вектор выхода $y(t)$.

2. Сформировать требования к качеству процессов в переходном и установившемся режимах.

3. Сформировать модельное векторно-матричное представление объекта в виде (1).

4. Задать значение λ_{gi} и решить уравнение $K_g = \arg \{CBK_g = \lambda_{gi} I\}$.

5. Сформировать собственный вектор матрицы F : $\xi_i = BK_g g_0$.

6. Записать матричное уравнение Сильвестра $M\bar{\Lambda} - AM = -B\bar{H}$ в декомпозированной форме:

$$\begin{bmatrix} \tilde{M} : \bar{M} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \tilde{\Lambda} & 0 \\ 0 & \bar{\Lambda} \end{bmatrix} - A \begin{bmatrix} \tilde{M} : \bar{M} \end{bmatrix} = -B \begin{bmatrix} \tilde{H} : \bar{H} \end{bmatrix}, \quad (14)$$

где $\tilde{M} = \xi_i$, $\tilde{\Lambda} = \lambda_i$; $F\xi_i = \lambda_i\xi_i$, так что выражение (14) распадается на два уравнения Сильвестра

$$(\lambda_i I - A) = -B\tilde{H}; \quad \bar{M}\bar{\Lambda} - A\bar{M} = -B\bar{H}, \quad (15)$$

где $(\bar{\Lambda}, \bar{H})$ — наблюдаемая пара, $\bar{\Lambda} = \text{diag}\{\lambda_j : j \neq i; j = \overline{1, n}\}$; решить первое уравнение (15) относительно матрицы \tilde{H} , а второе — относительно матрицы \bar{M} ; сформировать матрицы $M = \begin{bmatrix} \tilde{M} : \bar{M} \end{bmatrix}$, $H = \begin{bmatrix} \tilde{H} : \bar{H} \end{bmatrix}$, при этом обеспечить максимальную близость собственных векторов $\xi_j = M_j$, $j \neq i$, матрицы F к ортогональности, с тем чтобы доставить модальную робастность системе.

7. Вычислить матрицу обратных связей $K = HM^{-1} = \begin{bmatrix} \tilde{H} : \bar{H} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \tilde{M} : \bar{M} \end{bmatrix}^{-1}$.

8. Построить реализационную версию закона управления:

$$\begin{aligned} u(t) &= K_g g(t) - Kx(t) = K_g g(t) - K_y y(t) - K_x x(t) |_{K_y = K_g} = \\ &= K_g (g(t) - y(t)) - K_x x(t) = K_g \varepsilon(t) - K_x x(t) |_{K_g = K_\varepsilon} = K_\varepsilon \varepsilon(t) - K_x x(t), \end{aligned}$$

где $K_x = K - K_g C$.

В заключение следует заметить, что класс решений поставленной задачи может быть расширен за счет использования алгебраических свойств левых собственных векторов матрицы F состояния системы (4), в качестве которых можно использовать строки C^k , $k = \overline{1, m}$, матрицы выхода $C = \text{col}\{C^k, k = \overline{1, m}\}$. В этом случае матричная мультипликативная структура $C(sI - F)^{-1} BK_g$ получит представление $C(sI - F)^{-1} BK_g = \text{col}\{(s - \lambda_k)^{-1} C^k BK_g, k = \overline{1, m}\}$, допускающее последующее развитие алгебраического подхода к решению задачи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акунова А. М., Дударенко Н. А., Ушаков А. В. Проблемы вырождения сложных систем: технологии контроля при гармоническом и стохастическом экзогенных воздействиях // Современные технологии: Сб. статей / Под ред. С. А. Козлова. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2004.
2. Дударенко Н. А., Ушаков А. В. Вырождение сложных динамических систем с равнотемповыми структурными компонентами // Программирование, управление и информационные технологии: Науч.-техн. вестн. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2005. Вып. 19.
3. Лаврентьев В. В., Ушаков А. В. К вопросу о синтезе перекрестных связей, обеспечивающих синхронную работу параллельно включенных агрегатов // Приборы и системы автоматки: Тр. ЛИТМО. Л.: ЛИТМО, 1975. Вып. 85.
4. Мирошник И. В., Ушаков А. В. Синтез алгоритма синхронного управления системой квазиоднотипных объектов // Автоматика и телемеханика. 1977. № 11.
5. Мирошник И. В. Согласованное управление многоканальными системами. Л.: Энергоатомиздат, 1990.
6. Система управления лентопротяжным механизмом / В. А. Власенко, И. В. Мирошник, Ю. А. Сабинин, А. В. Ушаков и др. // Электротехн. пром-сть. Сер. Электропривод. 1977. Вып. 5(58).

7. Гантмахер Ф. Р. Теория матриц. М.: Наука, 1973.

8. Никифоров В. О., Ушаков А. В. Управление в условиях неопределенности: чувствительность, адаптация, робастность. СПб.: СПбГИТМО (ТУ), 2002.

Рекомендована кафедрой
систем управления и информатики

Поступила в редакцию
26.06.07 г.

УДК 62.50

В. В. ГРИГОРЬЕВ, Ю. В. МЕДЫНСКИЙ, М. М. МОТЫЛЬКОВА

*Санкт-Петербургский государственный университет
информационных технологий, механики и оптики*

О. К. МАНСУРОВА

*Северо-Западный государственный заочный технический университет
Санкт-Петербург*

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЕРТИКАЛЬНОЙ КАЧКИ КОРАБЛЯ

Описывается алгоритм прогнозирования вертикальной качки на море, который может быть использован для повышения точности работы бортовых систем автоматического управления посадкой самолетов палубной авиации и разработки новых систем управления беспилотными летательными аппаратами.

Введение. Научные модели, применяемые для описания явлений природы, можно разделить на детерминированные и вероятностные [1]. В вероятностной модели любого явления наряду с контролируруемыми присутствуют случайные факторы, вызывающие при его повторении неконтролируемые колебания.

В теории случайных процессов рассматривается специальный класс — нерегулярная качка [1]. Движение объектов, в данном случае корабля, под действием нерегулярных возмущений (нерегулярное волнение) осуществляется по случайному закону. Процесс качки характеризуется существенной неопределенностью. Описание этого процесса детерминированной моделью не отразит полностью характер его развития. Поэтому при построении модели качки будем опираться на вероятностную модель — случайный процесс.

Расчет математической модели процесса качки. Случайный процесс вертикальной качки характеризуется явной колебательностью. В общем случае спектральная плотность случайного процесса с явно выраженной резонансной частотой ω_0 , коэффициентом затухания α и константой уровня G_0 определяется выражением [2, 3]

$$S(\omega) = \frac{\omega_0^4 G_0}{\omega^4 + 2(2\alpha^2 - \omega_0^2)\omega^2 + \omega_0^4}.$$

Предположив, что случайный процесс вертикальной качки представляет собой гауссов белый шум, постоянный „белый“ спектр которого искажается при прохождении через колебательное звено, запишем выражение для передаточной функции формирующего фильтра [2]:

$$\Phi(p) = \frac{\omega_0^2}{p^2 + 2\alpha p + \omega_0^2}.$$

Далее, учитывая тот факт, что ковариационная функция случайного процесса является обратным преобразованием Фурье от спектральной плотности, воспользовавшись таблицей отображений [1], запишем выражение для ковариационной функции:

$$R(\tau) = \frac{\omega_0^2 G_0}{2\alpha} e^{-\alpha|\tau|} \left(\tau \cos \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2} + |\tau| \frac{\alpha}{\sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}} \sin \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2} \right),$$

где τ — интервал дискретности (длительность одного такта бортовой ЦЭВМ).

В рассматриваемом случае, задаваясь значениями $\omega_0 = 0,6$ рад/с, $\alpha = 0,03$ рад, $G_0 = 1,7$, $\tau = 0,1$ с, получим [3]

$$S(\omega) = \frac{0,22}{\omega^4 - 0,72\omega^2 + 0,13};$$

$$R(\tau) = 10,2e^{-0,03|\tau|} (\cos 0,6\tau + 0,05 \sin 0,6|\tau|),$$

$$\Phi(p) = \frac{0,36}{p^2 + 0,06p + 0,36}$$

или в дискретном виде

$$\Phi_d(z) = \frac{0,0029z + 0,0029}{z^2 - 1,9904z + 0,994}.$$

Расчет фильтра Калмана для оценки состояния математической модели процесса качки. Учитывая постановку задачи прогнозирования (требуется оценить состояние системы, на вход которой поступает белый шум с известными структурой и параметрами модели системы), а также необходимость реализации прогноза, выберем в качестве устройства оценки оптимальный фильтр Калмана. Прогнозирование будем осуществлять в виде расчета динамики системы на основании текущей оценки состояния. Дискретная модель процесса качки с интервалом дискретности 0,1 с в форме „вход — состояние — выход“ задается уравнениями

$$x(k+1) = \bar{A}x(k) + \bar{B}u(k); \quad y(k) = \bar{C}x(k),$$

где

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} 0,922 & -0,0359 \\ 0,0996 & 0,9982 \end{bmatrix}, \quad \bar{B} = \begin{bmatrix} 0,0996 \\ 0,005 \end{bmatrix}, \quad \bar{C} = [0,6 \quad 0].$$

На вход модели поступает белый дискретный шум $u(k) = w(k)$, $\dim\{w(k)\} = 1$, с нулевым средним и единичной дисперсией Q :

$$E\{w(k)\} = 0, \quad E\{w(k)w^T(k)\} = Q = I,$$

где I — единичная $n \times n$ -матрица.

Дополним модель шумом измерений в виде аддитивного дискретного белого шума $v(k)$, $\dim\{v(k)\} = 1$, с нулевым средним и заданной дисперсией R :

$$E\{v(k)\} = 0, \quad E\{v(k)v^T(k)\} = R = 0,01.$$

Шум измерений и шум состояния предполагаются некоррелированными: $E\{w(k)v^T(k)\} = 0$. Таким образом, модель процесса качки задается уравнениями

$$x(k+1) = \bar{A}x(k) + \bar{B}w(k), \quad y(k) = \bar{C}x(k) + v(k)$$

или в скалярной форме

$$\begin{aligned} x_1(k+1) &= 0,922x_1(k) - 0,0359x_2(k) + 0,0996w(k); \\ x_2(k+1) &= 0,0996x_1(k) + 0,9982x_2(k) + 0,005w(k), \\ y(k) &= 0,6x_1(k) + v(k). \end{aligned}$$

Фильтр Калмана содержит модель объекта управления без учета шумов (модель сообщения) и обратную связь по невязке наблюдения:

$$\hat{x}(k+1) = \bar{A}\hat{x}(k) + U_H; \quad \hat{y}(k) = \bar{C}\hat{x}(k),$$

где $U_H = K_H \tilde{y} = \begin{bmatrix} k_1^H & k_1^H \end{bmatrix} (y - \hat{y})$, K_H — матрица коэффициентов обратной связи.

Модель ошибок $\tilde{x} = x - \hat{x}$ принимает следующий вид:

$$\begin{aligned} \tilde{x}(k+1) &= (\bar{A} - K_H C) \tilde{x}(k) + \begin{bmatrix} \bar{B} & -K_H \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} w(k) \\ v(k) \end{bmatrix} = A_H \tilde{x}(k) + B_H \xi(k); \\ \tilde{y}(k) &= \bar{C} \tilde{x}(k), \end{aligned}$$

где $A_H = \bar{A} - K_H C$ — матрица входов модели наблюдения, $B_H = \begin{bmatrix} \bar{B} & -K_H \end{bmatrix}$ — матрица выходов модели наблюдения, $\xi(k) = \begin{bmatrix} w(k) \\ v(k) \end{bmatrix}$.

Определим ковариационную матрицу ошибки в установившемся режиме в виде решения алгебраического уравнения Риккати:

$$P_\infty = \bar{A} \left\{ P_\infty - P_\infty \bar{C}^T \left[\bar{C} P_\infty \bar{C}^T + R \right]^{-1} \bar{C} P_\infty \right\} \bar{A}^T + \bar{B} Q \bar{B}^T.$$

В результате получаем следующее значение для матрицы P_∞ :

$$P_\infty = \begin{bmatrix} 0,0109 & 0,0178 \\ 0,0178 & 0,0585 \end{bmatrix}$$

— установившееся значение матрицы ковариаций.

Теперь определим матрицу коэффициентов обратной связи:

$$K_H = P_\infty C^T \left[C P_\infty C^T + R \right]^{-1} = [0,5441 \quad 0,7473]^T.$$

Процесс вертикальной качки корабля и его оценка с помощью фильтра Калмана представлены на рис. 1.

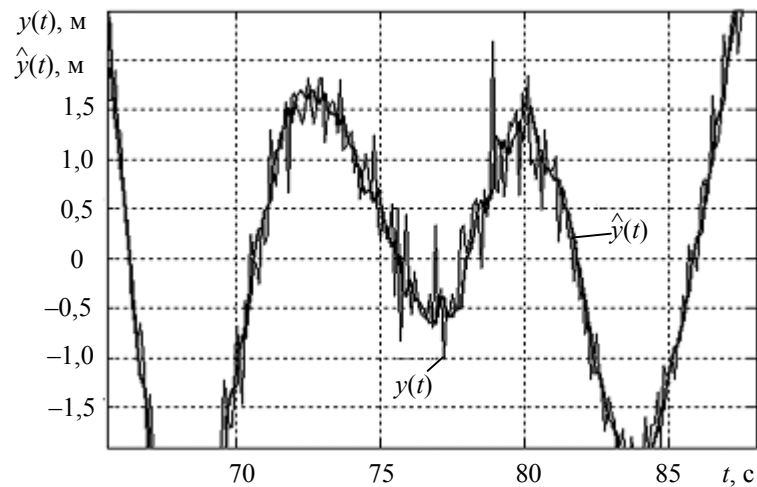


Рис. 1

Расчет состояния системы в заданный момент времени. После того как вычислена оценка вектора состояния модели процесса качки, можно получить прогноз значения вектора

состояния $\hat{x}(k)$ через несколько тактов в будущем: $\hat{x}(k+m)$, m — число интервалов дискретности (число тактов).

Рассмотрим аналитическое решение уравнения, определяющего динамику развития процесса качки для некоторого, заданного в момент времени k , состояния $\hat{x}(k)$:

$$\begin{aligned}\hat{x}(k+1) &= \bar{A}x(k); \\ \hat{x}(k+2) &= \bar{A}x(k+1) = \bar{A} \bar{A}x(k) = \bar{A}^2 x(k); \\ \hat{x}(k+3) &= \bar{A}x(k+2) = \bar{A} \bar{A}^2 x(k) = \bar{A}^3 x(k); \\ &\dots \\ \hat{x}(k+m) &= \bar{A}x(k+m-1) = \bar{A}^m x(k).\end{aligned}$$

Таким образом, путем доказательства методом математической индукции можно утвердить равенство, связывающее текущую оценку состояния и ее значение через некоторое число тактов в будущем [3]:

$$\hat{x}(k+m) = \bar{A}^m x(k).$$

Приведение непрерывного значения интервала прогнозирования t_n к числу интервалов дискретности легко осуществить на основании заданного значения интервала дискретности τ [4]: $m = t_n/\tau$.

Алгоритм прогнозирования. Исходные данные: $\omega_0 \in R^+$, $G_0 \in R^+$, $\alpha \in R^+$ ($0 \dots 1$), $\tau \in R^+$ ($\tau \leq 0,01 t_n$).

1. Построение модели „вход — состояние — выход“ процесса качки. Построим модель в канонической управляемой форме:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_0^2 & -2\alpha \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} \omega_0^2 G_0 & 0 \end{bmatrix}.$$

2. Построение фильтра Калмана:

$$\begin{aligned}K_H &= P_\infty C^T [CP_\infty C^T + R]^{-1}; \\ P_\infty : P_\infty &= A \left\{ P_\infty - P_\infty C^T [CP_\infty C^T + R]^{-1} CP_\infty \right\} A^T + BQB^T, \\ Q &= I, \quad R = 0,01.\end{aligned}$$

3. Расчет состояния модели процесса качки:

$$\hat{x}(k+1) = A\hat{x}(k) + K_H (y(k) - C\hat{x}(k)) = A\hat{x}(k) + K_H (y(k) - \hat{y}(k)), \quad \hat{x}(0) = 0.$$

4. Расчет матрицы состояния в заданный момент:

$$m = t_n/\tau, \quad A^m = (A)^m.$$

5. Расчет прогноза состояния:

$$\hat{x}_{m+i} = A^m \hat{x}_i.$$

Статистический анализ системы прогнозирования. Определим зависимость между интервалом прогнозирования и статистическими показателями ошибки прогнозирования. Для вычисления средних по множеству характеристик разобьем интервал прогнозирования $0 \dots 20$ с периодом $\tau = 0,1$ с на 200 квантов и для каждого кванта определим характеристики

на основании рассмотрения 50 реализаций случайного процесса ошибки в установившемся режиме [5]. Графики зависимости математического ожидания ошибки и дисперсии от времени представлены на рис. 2 и 3 соответственно.

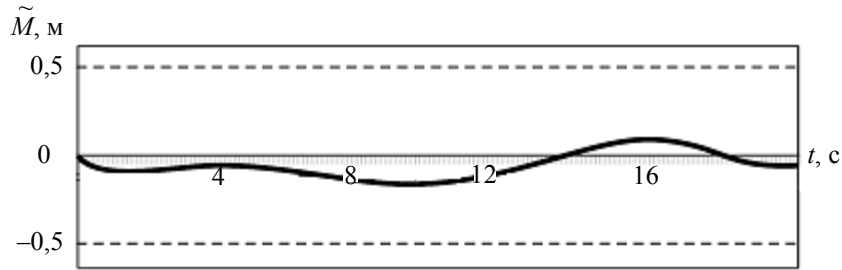


Рис. 2

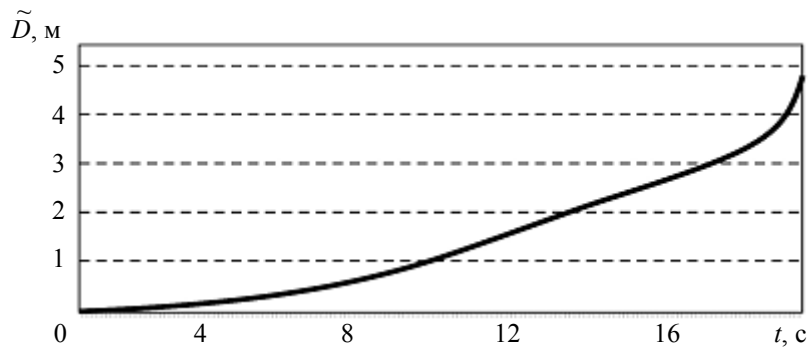


Рис. 3

По результатам анализа можно сделать следующие выводы: интервал прогнозирования t_n , обеспечивающий приемлемую точность прогноза, составляет 5 с, что согласуется со значением периода корреляции случайного процесса. Увеличить значение этого интервала можно за счет увеличения периода корреляции, т.е. за счет уменьшения частоты исходной модели процесса качки. Данное утверждение иллюстрируется графиком прогноза качки с резонансной частотой $\omega_0 = 0,1$ рад/с и интервалом прогнозирования $t_n = 12$ с (рис. 4).

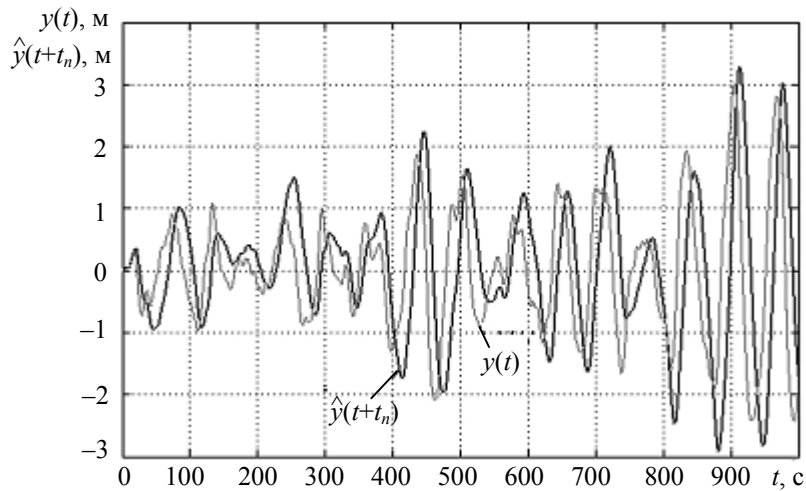


Рис. 4

Таким образом, можно утверждать, что спектральная плотность процессов качки, в которых присутствуют высокие частоты, будет шире, а график корреляционной функции уже, т.е. процесс качки будет обладать инерцией лишь в малом промежутке корреляции, и интервал прогнозирования, в котором обеспечивается приемлемая точность прогноза, также будет мал. В то же время для процессов качки, которые характеризуются низкими частотами, этот интервал будет больше [4, 3].

Под интервалом прогнозирования, в котором обеспечивается приемлемая точность прогноза, понимается максимальное время прогнозирования, когда ошибка прогноза составляет менее 1 м с вероятностью, превышающей 0,9.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вероятностные разделы математики. Учебник для бакалавров технических направлений / Под ред. Ю. Д. Максимова. СПб.: Иван Федоров, 2001. 592 с.
2. Бесекерский В. А., Попов Е. П. Теория систем автоматического управления. СПб.: Профессия, 2003. 752 с.
3. Случайные процессы. Т. 3. Оптимальная фильтрация, экстраполяция и моделирование: Учеб. пособие для вузов / Под ред. В. В. Сизых. М.: Радио и связь, 2004. 408 с.
4. Фильтрация и стохастическое управление в динамических системах / Под ред. К. Т. Леондеса. М.: Мир, 1980. 408 с.
5. Медич Д. Статистически оптимальные линейные оценки и управление. М.: Энергия, 1973. 387 с.

Рекомендована кафедрой
систем управления и информатики СПбГУ ИТМО

Поступила в редакцию
26.06.07 г.

В. В. БУРАКОВ

*Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения*

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ

Предлагается методика оценки качества программных средств, базирующаяся на использовании моделей качества и метрик программ. Производится моделирование понятия качества, указываются приоритетные показатели качества и принципы проектирования программ. На основе модели качества генерируется модель метрик, служащая для оценки программного средства.

Неопределенности и пробелы в формализации характеристик программных средств (ПС) оставляют широкое поле для произвола при оценивании их качества, ведут к появлению дефектов и ошибок при применении ПС пользователями [1]. Основными недостатками существующих моделей и методов оценки качества ПС являются:

- низкий уровень согласованности определений метрик;
- отсутствие обобщенного, адаптируемого подхода к оценке качества ПС посредством метрик;
- отсутствие согласованных, гибких моделей качества ПС, задающих недвусмысленное толкование характеристик качества и однозначную интерпретацию измерений;
- низкая информативность моделей качества ПС, сложность инженерной интерпретации результатов оценки качества и отсутствие связи модели качества ПС с принципами проектирования.

Под моделью качества ПС понимается совокупность концептуальных элементов и структурных связей между ними, характеризующая качество программной системы.

В настоящей статье описывается методика, обобщающая основные распространенные стандарты и подходы к оценке качества ПС и направленная на преодоление упомянутых недостатков.

Оценка качества представляет собой детерминированный процесс, основные этапы которого представлены в нотации диаграммы действий UML (рис. 1). Рассмотрим этапы оценки качества ПС в соответствии с предлагаемой методикой подробнее.

Определение целей оценки. Стоящая перед экспертами цель оценки влияет на разрабатываемую модель качества ПС и, следовательно, на весь процесс оценки. Положим в качестве целей оценки определение уровня качества объектно-ориентированного ПС в соответствии со стандартом ISO/IEC 25 000.

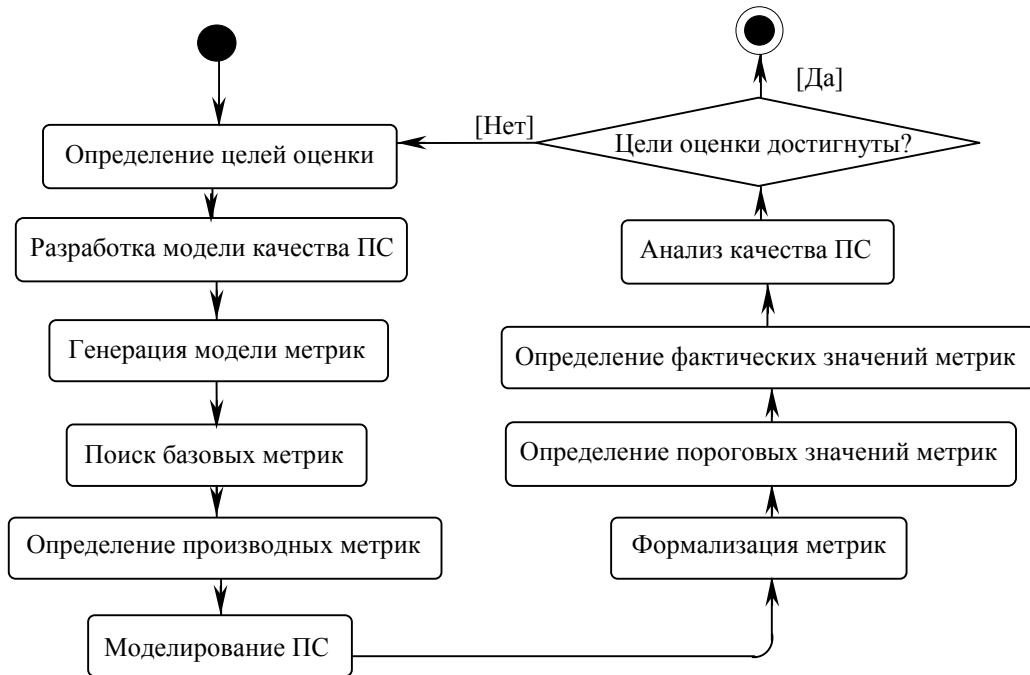


Рис. 1

Разработка модели качества ПС. Модель качества определяется с помощью теории категорий. Категория качества Q используется для представления понятия качества ПС и состоит из объектов $Ob(Q)$ и морфизмов $Mor(Q)$. Объекты категории образуют множество

$Ob(Q) = \bigcup_{i=0}^n Q_i$, где $Q_i = \{q_m^i\}_{m=1}^{k_i}$ — множество объектов, соответствующих характеристикам качества и принципам проектирования i -го уровня иерархии модели, k_i — число элементов множества Q_i . Морфизмы категории задают иерархические связи элементов качества

$Mor(Q) = \{ \xi_{a,b}^{i,j} \} = Mor_{si}(Q) \cup Mor_{di}(Q) \cup Mor_{sl}(Q)$, где $Mor_{si}(Q)$, $Mor_{di}(Q)$ и $Mor_{sl}(Q)$ —

множества соответственно строгих, нестрогих иерархических и одноуровневых морфизмов. Для упрощения изложения примем, что главной оцениваемой характеристикой качества является „удобство сопровождения“ ПС. Согласно стандарту ISO/IEC 25 000 эта характеристика зависит от подхарактеристик „удобство проверки“, „стабильность“, „удобство внесения изменений“, „анализируемость“ и „соответствие стандартам сопровождения“. Декомпозируем подхарактеристики качества на ряд принципов проектирования применительно к объектно-ориентированному стилю. Это принципы „высокое сцепление“, „низкая связность“, „отсутствие классов-данных“ (классов, содержащих большое количество данных-членов в сравнении с функциями-членами) и „отсутствие классов-монстров“ (больших и сложных классов, малозависящих от остальных классов). Пример модели качества ПС представлен на рис. 2.

Генерация модели метрик. Категория метрик MS имеет в качестве объектов базовые M^b и производные M^d метрические пространства, а в качестве морфизмов — операторы комплексирования A^c , служащие для описания зависимости между производными и базовыми метриками. Модель метрик генерируется путем применения функтора (т.е. отображения категорий, сохраняющего их структуру [2]) из модели качества. Функтор $QM: Q \rightarrow MS$ является контравариантным одноместным функтором, отображающим объекты категории качества на метрические пространства категории измерений

$QM(Ob(Q)) = Ob(MS)$, а морфизмы категории качества — на морфизмы категории измерений, которые представляют собой операторы комплексирования над метрическими пространствами $QM(Mor(Q)) = Mor(MS)$.

Результат применения функтора к рассматриваемой модели качества приведен на рис. 3.

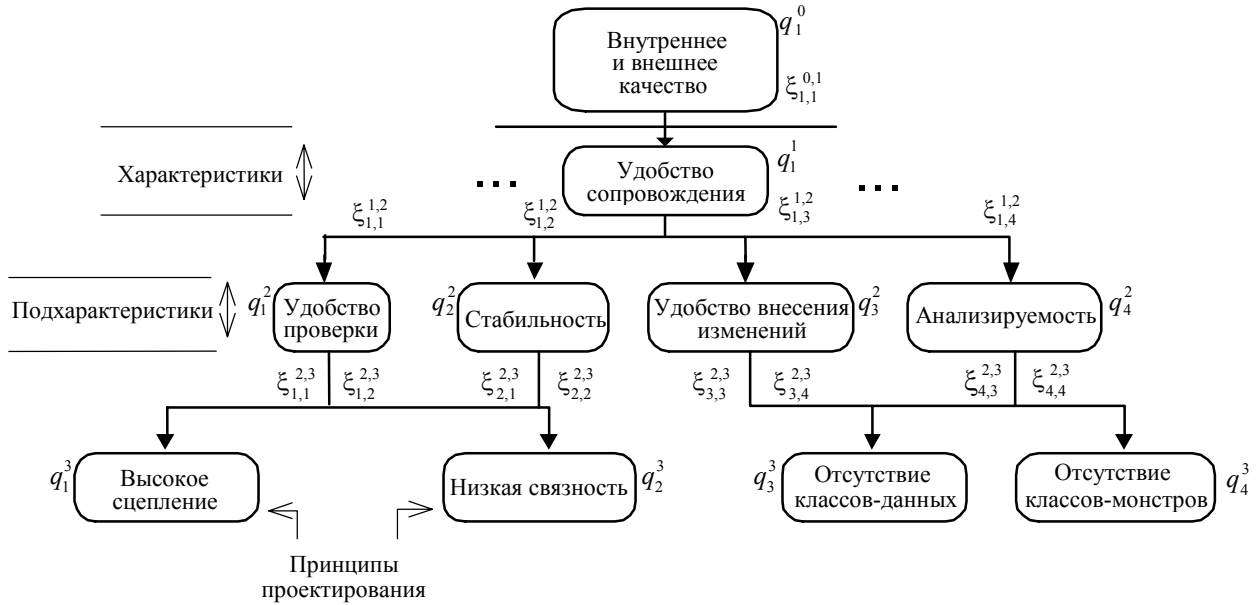


Рис. 2

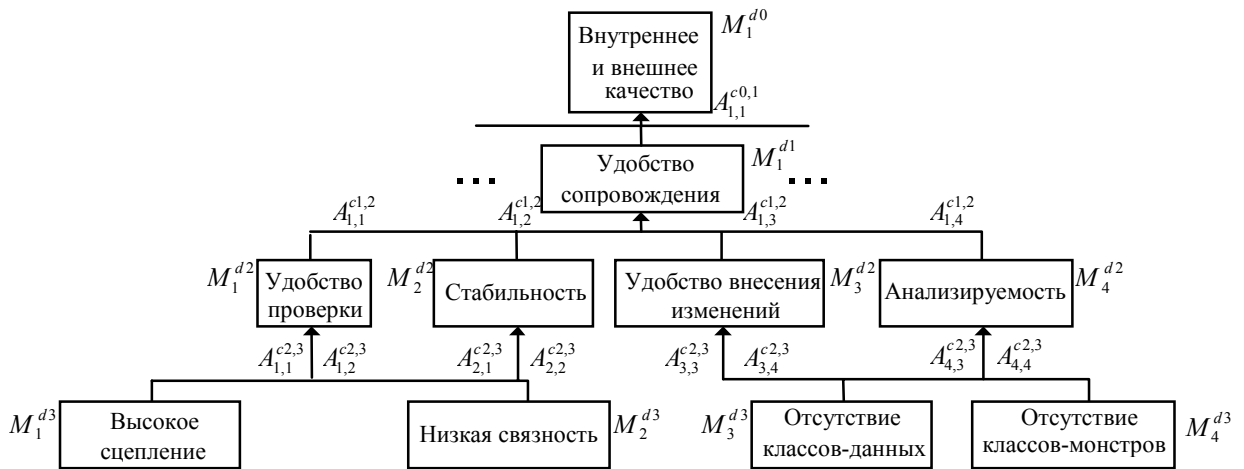


Рис. 3

Поиск базовых метрик и определение производных метрик. Процесс подбора метрик заключается в формировании измерительного базиса из производных и базовых метрик, необходимого и достаточного для обеспечения полноты оценки всех элементов модели качества ПС. Процесс подбора метрик основывается на существующих стандартах, мнениях экспертов и положительных примерах управления качеством ПС. Выберем для оценки качества ПС следующие метрики, определенные в работе [3]:

- метрики связности: NR, NBR, NABR, NAR, NRA;
- метрики сцепления: LCOM, PP, QP, NMWA;
- метрики классов-данных: WOCF, WOCM, WOC, NOPA, NOA, NOP, MC, WMC;
- метрики классов-монстров: WMC, ATFD, QP, NM, TCC.

На рис. 4 представлена результирующая модель метрик.

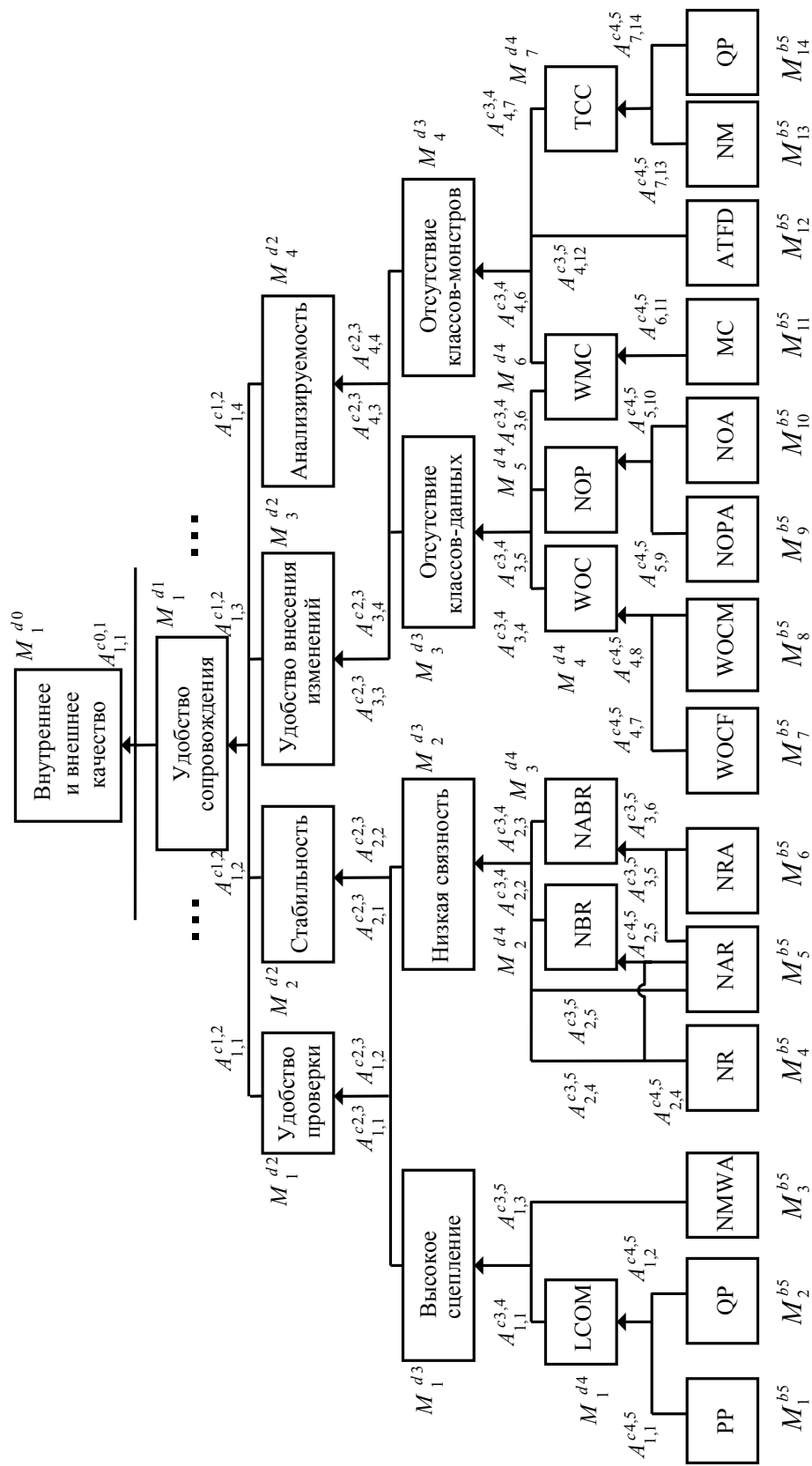


Рис. 4

Моделирование ПС. Для моделирования программных сущностей используются ориентированные помеченные типизированные графы. Пусть $T = (VT, ET)$ — пара непересекающихся конечных множеств predetermined типов вершин и ребер; (L, A) — помеченный T -типизированный граф G , который является двойкой $(g, type)$, такой что g — (L, A) -помеченный граф и $type = (vt : V \rightarrow VT, et : E \rightarrow ET)$ — пара функций, связывающих соответственно с каждой вершиной и ребром их типы. Более подробно модель ПС описана в работе [4]. Множество $V_G = \{C, F, O, G, L\}$ всех возможных типов вершин служит для представления соответственно класса (C), открытого поля (F), метода (O), открытых методов доступа или модификации поля (G), оператора цикла (L). Отношения между программными сущностями представляются с помощью ребер. Описание множества $E_G = \{i, u, o, t, a, b\}$ всех возможных типов ребер представлено в табл. 1.

Таблица 1

Тип	Описание
$i : C \rightarrow C$	Использование абстрактного предка класса
$u : C \rightarrow C$	Использование класса
$o : F \rightarrow C$	Принадлежность поля классу
$o : M \rightarrow C$	Принадлежность метода классу
$o : G \rightarrow C$	Принадлежность открытых методов доступа или модификации поля классу
$t : F \rightarrow C$	Классовый тип поля
$a : O \rightarrow F$	Доступ к полю из метода
$a : G \rightarrow F$	Доступ к полю из открытых методов доступа или модификации поля
$b : L \rightarrow O$	Принадлежность оператора цикла методу
$b : L \rightarrow L$	Вложенность операторов циклов

Формализация метрик. На этом этапе на основе графовой модели ПС определяются формулы для расчета базовых и производных метрик. Обозначим как m_j^{bi} и m_j^{di} соответственно базовые и производные метрики, заданные на пространствах M_j^{bi} и M_j^{di} . Формулы для расчета метрик уровня класса приведены в табл. 2, где v — идентификатор вершины, соответствующей оцениваемому классу; $OV_G(v) = \{s(e) : e \in \{E_G : t(e) = v\}\}$; $IV_G(v) = \{t(e) : e \in \{E_G : t(e) = v\}\}$;

$$ivec(v, t, r) = \left| \{t(e) : e \in IV_G(v) \wedge vt(s(e)) = t \wedge et(e) = r\} \right|;$$

$$ivc(v, t) = \left| \{s(e) \in IV_G(v) : vt(s(e)) = t\} \right|;$$

$$ipath(v, t, r) = \left| \{t(e) : e \in IV_G^n(v) \wedge vt(s(e)) = t \wedge et(e) = r\} \right|.$$

Таблица 2

Метрика	Формула	Допустимый интервал	Фактическое значение
m_4^{b5} (NR)	$m_4^{b5} = ovec(v, C, u) = \{s(e) : e \in OV_G(v) \wedge vt(t(e)) = C \wedge et(e) = u\}$	[2,000, ∞]	3,250
m_2^{d4} (NBR)	$m_2^{d4} = \frac{ \{s(e) : e \in OV_G(v) \wedge vt(t(e)) = C \wedge et(e) = u\} }{ \{t(e) : e \in IV_G(v) \wedge vt(s(e)) = C \wedge et(e) = u\} }$	[0,333, ∞]	0,460
m_3^{d4} (NABR)	$m_3^{d4} = \frac{ivec(v, C, i)}{ivec(v, C, u)}$	[1,000, ∞]	1,211
m_5^{b5} (NAR)	$m_5^{b5} = ivc(v, C, u)$	[1,000, ∞]	1,340

Продолжение табл. 2

Метрика	Формула	Допустимый интервал	Фактическое значение
m_6^{b5} (NRA)	$m_6^{b5} = \text{ivec}(v, C, i)$	[0,100, ∞]	0,254
m_1^{d4} (LCOM)	$m_1^{d4} = m_1^{d5} - m_2^{d5}$	[0,000, ∞]	0,118
m_1^{b5} (PP)	$m_1^{b5} = \sum_{\substack{m_1, m_2 \in \{s(e) \in IV_G(v) : \\ vt(s(e))=M\} \wedge \\ \wedge OV_G(m_1) \cap OV_G(m_2) =1}} \{m_2\} $	[0,000, 1,000]	0,386
m_2^{b5} (QP)	$m_2^{b5} = \sum_{\substack{f \in \{s(e) \in IV_G(v) : \\ vt(s(e))=F\}}} \frac{\text{ivec}(f, M, a)!}{2!(\text{ivec}(f, M, a) - 2)!}$	[0,333, ∞]	0,268
m_3^{b5} (NMWA)	$m_3^{b5} = \{m \in \{s(e) \in IV_G(v) : vt(s(e)) = M\} \wedge OV_G(m) = 1\} $	[0,000, 0,333]	0,156
m_7^{b5} (WOCF)	$m_7^{b5} = \text{ivc}(v, M) - \text{ivc}(v, G)$	[2,000, 10,000]	2,890
m_8^{b5} (WOCM)	$m_8^{b5} = \text{ivc}(v, M)$	[3,000, 10,000]	3,780
m_4^{d4} (WOC)	$m_4^{d4} = \frac{m_7^{d5}}{m_8^{d5}} = 1 - \frac{\text{ivc}(v, G)}{\text{ivc}(v, M)}$	[0,500, 1,000]	0,765
m_9^{b5} (NOPA)	$m_9^{b5} = \text{ivc}(v, F)$	[0,500, 1,000]	0,679
m_{10}^{b5} (NOA)	$m_{10}^{b5} = \text{ivc}(v, G)$	[2,000, 10,000]	3,892
m_5^{d4} (NOP)	$m_5^{d4} = m_9^{b5} + m_{10}^{b5} = \text{ivc}(v, F) + \text{ivc}(v, G)$	[2,500, 11,000]	4,571
m_{11}^{b5} (MC)	$m_{11}^{b5} = \max(\text{ipath}(m, L, b))$	[0,100, 2,000]	0,256
m_6^{d4} (WMC)	$m_6^{d4} = \sum_{\substack{m \in \{s(e) \in IV_G(v) : \\ vt(s(e))=M\}}} m_{11}^{b5}(m) = \\ = \sum_{\substack{m \in \{s(e) \in IV_G(v) : \\ vt(s(e))=M\}}} \max(\text{ipath}(m, L, b))$	[0,100, 4,000]	0,348
m_{12}^{b5} (ATFD)	$m_{12}^{b5} = \sum_{\substack{m \in \{s(e) \in IV_G(v) : \\ vt(s(e))=M\}}} \{OV_G(m)\} / \{IV_G(v)\} $	[0,100, 2,000]	0,328
m_{13}^{b5} (NM)	$m_{13}^{b5} = \text{ivc}(v, M)$	[1,000, 10,000]	5,369
m_7^{d4} (TCC)	$m_7^{d4} = m_2^{b5} / m_{13}^{b5}$	[0,010, ∞]	0,022

На основе формул метрик уровня классов определяются формулы метрик уровня системы (табл. 3).

Обобщенный вид этих формул $m_j^{di} = \sum_{l=1}^n m_j^{di}(v_l) / n$, где n — количество классов. Преобразованные

таким способом метрики уровня классов образуют метрические пространства уровня системы, на основе которых формируются новые производные пространства для расчета остальных высокоуровневых метрик ПС.

Таблица 3

Метрика	Формула	Допустимый интервал	Фактическое значение
Высокое сцепление	$m_1^{d3} = \frac{3m_1^{d4} + m_3^{b5}}{4}$	[0,100, ∞]	0,128
Низкая связность	$m_2^{d3} = \frac{m_4^{b5} + m_5^{b5} + 2m_2^{d4} + 2m_3^{d4}}{6}$	[1,000, 3,000]	1,322
Отсутствие классов-данных	$m_3^{d3} = \frac{m_4^{d4} + m_5^{d4} + 2m_6^{d4}}{4}$	[1,000, 2,000]	1,442

Продолжение табл. 3

Метрика	Формула	Допустимый интервал	Фактическое значение
Отсутствие классов-монстров	$m_4^{d3} = \frac{m_6^{d4} + 3m_{12}^{b5} + m_7^{d4}}{5}$	[0,010, 1,000]	0,271
Удобство проверки	$m_1^{d2} = \frac{m_1^{d3} + 5m_2^{d3}}{6}$	[1,000, 2,000]	1,123
Стабильность	$m_2^{d2} = \frac{4m_1^{d3} + 3m_2^{d3}}{7}$	[0,500, 1,000]	0,640
Удобство внесения изменений	$m_3^{d2} = \frac{m_3^{d3} + 3m_4^{d3}}{4}$	[0,500, 1,000]	0,563
Анализируемость	$m_4^{d2} = \frac{3m_3^{d3} + 4m_4^{d3}}{7}$	[0,500, 1,000]	0,772
Удобство сопровождения	$m_1^{d1} = \frac{m_1^{d2} + 2m_2^{d2} + 5m_3^{d2} + 3m_4^{d2}}{11}$	[0,500, 1,000]	0,671
Внутреннее и внешнее качество	$m_1^{d0} = m_1^{d1}$	[0,500, 1,000]	0,671

Определение пороговых и фактических значений метрик. Для апробации методики оценки качества ПС было выбрано специальное программное обеспечение, предназначенное для военной телемедицины [5]. Система содержит около 70 000 строк кода, порядка 500 классов на языке C++. Для определения значений метрик было разработано ПС на языке C#. Значения метрик определялись в соответствии с формулами для системы целом, а пороговые значения — в соответствии с допустимым интервалом, в пределах которого значение метрики интерпретируется как оптимальное. Допустимые интервалы и фактические значения метрик для оцениваемой системы приведены в табл. 2, 3.

Анализ качества ПС. По результатам измерений можно сделать вывод о том, что в целом качество анализируемого ПС является удовлетворительным. При этом значение метрики QR не принадлежит допустимому интервалу, на основе чего выявляются программные сущности, которые необходимо переработать. При интерпретации результатов оценки качества может быть принято решение о необходимости внесения изменений в процесс оценки, например: изменение модели качества ПС, корректировка производных и базовых метрик, изменение функциональных зависимостей производных метрик качества.

Применение описанной формализованной количественной методики оценки качества программных средств позволит создать серьезную основу для процесса управления качеством, принятия управленческих и инженерных решений на протяжении всего жизненного цикла ПС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Липаев В. В. Выбор и оценивание характеристик качества программных средств. 2001.
2. Цапенко М. С., Шульгейфер Е. Г. Лекции по теории категорий. М.: Наука, 1974.
3. Lore M., Kidd J. Object-Oriented Software Metrics. N.Y.: Prentice Hall, 1994.
4. Бураков В. В. Формализация процесса преобразований программного обеспечения // Управление и информатика в авиакосмических системах: Прил. к ж-лу „Мехатроника, автоматизация, управление“. 2006. № 11. С. 19—24.
5. Бураков В. В., Устюхин Н. В., Ковригин Д. А. Применение телемедицинских технологий в медицинской службе Вооруженных сил Российской Федерации // Медицина и высокие технологии. 2006. № 1.

Рекомендована кафедрой
компьютерной математики и программирования

Поступила в редакцию
11.09.07 г.

ЭЛЕКТРОННЫЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА

УДК 621.034.4-8:362.41

С. О. ЕРШОВ

*Балтийский государственный технический университет „Военмех“ им. Д. Ф. Устинова
Санкт-Петербург*

П. МАЙЕР

Эйндховен, Нидерланды

СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ С НЕВИЗУАЛЬНЫМ ПРЕДСТАВЛЕНИЕМ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ИНФОРМАЦИИ

Рассматриваются системы, позволяющие человеку воспринимать пространственную информацию посредством слуха или осязания и применяющиеся в технических средствах ориентирования для слепых и работников аварийно-спасательных служб.

Историческая справка. Исторически одним из основных стимулов развития систем технического зрения являлись проблемы слепых, и наибольшее число разработок предпринимались именно для их нужд. В этой связи в настоящей статье речь пойдет преимущественно о приборах для слепых.

Предпосылкой возникновения рассматриваемых устройств можно считать открытие в 1817 г. химического элемента селена, обладающего светочувствительными свойствами. Появление непосредственно технических средств ориентирования (ТСО) для инвалидов по зрению относится к 1897 г., когда Нойжевский изобрел устройство „Electroftalm“, в котором с помощью селеновой пластинки регулировалась громкость звукового сигнала, что позволяло слепому определять степень освещенности находящихся перед ним крупных объектов.

В 50—60-х гг. XX в. началось использование ультразвуковой локации в целях обнаружения препятствий на пути слепого и измерения расстояний до них. Наиболее весомый вклад в это направление внес Л. Кэй [1]. Несколько позже в качестве источника информации об окружающей среде стали использовать лазерные дальнометры, работающие в инфракрасном (ИК) диапазоне частот. Обычные (немонохроматические) ИК-светодиоды также нашли применение в примитивных детекторах препятствий. С конца 60-х гг. в связи с развитием телевидения появились новые направления в решении проблемы пространственного ориентирования слепых. Например, Бах-и-Рита использовал матрицу тактильных стимуляторов, располагаемую на спине пользователя для передачи ему информации о фронтальном образе среды, получаемом от телевизионной камеры. Бриндли и Добелле использовали для тех же целей матрицу нейростимуляторов, имплантированных в зрительный отдел головного мозга.

В 90-х гг. П. Майер изобрел систему, названную „VOICE“ [2], позволяющую преобразовывать информацию от видеокамеры в звуковые образы. Тогда же начались работы по использованию систем объемного звучания для синтеза трехмерных звуковых образов среды (Гонсалес-Мора, Каваи). В настоящее время в нескольких университетах западных стран ведутся работы по созданию матриц, стимулирующих различные участки зрительного нерва слепого. Информацию о среде поставляют также телевизионные камеры. Среди ведущих специалистов этого направления можно отметить Хумаюна, Риццо и Зреннера.

Быстрое развитие вычислительной техники привело в начале XXI в. к возможности создания миниатюрных устройств, способных реализовать процесс распознавания сложных телевизионных образов в реальном времени. В таких системах предпочтительным способом представления информации являются синтезированные речевые сообщения. Одним из последних (2004 г.) достижений в данном направлении является разработка японского ученого Шиоямы, условно названная „electronic eye“ (электронный глаз).

В это же время в Санкт-Петербургском ЦНИИ робототехники и технической кибернетики начались разработки системы с речевым представлением информации, полученной от стереоскопической видеосистемы (руководитель О. А. Мельников).

Достижения в области спутниковой связи также используются при создании навигационных средств для слепых. Информация, получаемая через систему глобального позиционирования (GPS), поставляется слепому посредством речевых сообщений. Впрочем, здесь речь идет не об обнаружении препятствий, а лишь о сообщении пользователю его координат и ориентации по сторонам света.

Классификация ТСО. По способу получения пространственной информации известные на сегодня системы технического зрения можно разделить на три группы:

- системы со световой локацией в инфракрасном диапазоне частот;
- системы с ультразвуковой локацией;
- телевизионные системы.

Для невизуального представления информации в ТСО применяются:

- звуковые излучатели;
- тактильные датчики;
- матрицы нейростимуляторов.

Способы замещения зрительного восприятия. В соответствии с названными каналами передачи информации слепому разработка высокоинформативных приборов осуществляется по следующим направлениям:

- максимальное использование слуха;
- „кожное зрение“;
- сложное (матричное) стимулирование глазного нерва или зрительного отдела головного мозга.

Среди реализованных и серийно выпускаемых устройств замещения зрения в настоящее время наиболее широко представлены приборы, предназначенные для максимального использования слуха, что связано с высокой информативностью соответствующих ТСО, технологичностью их изготовления и отсутствием факторов, опасных для здоровья пользователя.

„Кожное зрение“ реализуется обычно посредством тактильных (электрических, тепловых или вибрационных) матриц, накладываемых на достаточно большие площади кожного покрова и стимулирующих участки кожи в соответствии с распределением яркости в телевизионном кадре, полученном от видеокамеры. Этот способ обладает невысокой разрешающей способностью, впрочем, следует отметить, что сейчас в Москве работает научная группа общественного фонда „Вереск“ под руководством А. Брызгалова, которая занимается проектом „Тактильное виденье“, и полученные ими результаты дают надежду на частичное решение данной проблемы. Последние достижения упомянутого выше Бах-и-Риты связаны с использованием языка в

качестве чувствительного органа для восприятия сигналов тактильной матрицы. Однако, по некоторым отзывам, такой способ неудобен для повседневного применения.

Эксперименты по имплантации матриц в головной мозг, выполненные, например, Добелле, показали работоспособность соответствующих ТСО, но опасность для здоровья нейрохирургических операций и их высокая стоимость делают этот путь малопривлекательным для слепых.

На основании приведенных рассуждений устройства, ориентированные на максимальное использование слухового канала восприятия, представляются наиболее перспективными.

ТСО, максимально использующие слух. Рассмотрим принципы действия двух наиболее информативных ТСО этого типа: ультразвукового прибора „Kaspa“ (Л. Кэй) и телевизионной системы „VOICE“ (П. Майер).

„Kaspa“. Конструктивно этот прибор представляет собой модифицированные очки [3], в оправе которых размещаются ультразвуковой (УЗ) излучатель, направленный прямо вперед и три УЗ-приемника: ось центрального приемника направлена прямо вперед, оси боковых отклонены от центрального направления влево и вправо на угол около 10° . В дужки очков вмонтированы стереофонические микрофоны, звуковые сигналы от которых подводятся к ушам пользователя при помощи пластиковых трубочек. Блок электроники размещается в отдельном корпусе, носимом в кармане и соединенном с „очками“ кабелем.

Частота излучаемого сигнала синусоидальной формы периодически меняется по линейно убывающему закону:

$$f_{\text{изл}}(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi_{\text{изл}}(t)}{dt} = f_{\text{в}} - \mu t_s,$$

где $\varphi_{\text{изл}}(t)$ — фаза напряжения на входе излучателя, рад; $f_{\text{в}}$ — верхняя граница частоты излучения (в начале цикла), Гц; μ — скорость изменения частоты в излучаемом ЛЧМ-сигнале, с^{-2} ; t_s — время, исчисляемое от начала n -го периода ЛЧМ, с; при этом $t = t_n + t_s$, где t_n — момент начала n -го периода, с.

Диапазон изменения излучаемой частоты в „очках“ Кэя 40—80 кГц.

В случае отражения излучаемого сигнала от препятствия, расположенного на расстоянии L от локатора, эхо-сигнал приходит на приемник с задержкой $\tau = 2L/c$, где c — скорость распространения УЗ-волны в воздухе. Тогда дистанция до отражающего объекта представляется разностной частотой, получаемой путем перемножения сигналов с приемника и передатчика. Разностная частота изменяется по закону

$$f_{\text{р}}(t) = f_{\text{изл}}(t) - f_{\text{пр}}(t) = \mu\tau(t) \left[1 - \frac{d\tau(t)}{dt} \right] - \frac{d\tau(t)}{dt} (f_{\text{в}} - \mu t_s),$$

где $f_{\text{пр}}$ — частота сигнала, снимаемого на выходе УЗ-приемника.

При $\tau = 2L/c = \text{const}$ (т.е. при нулевой относительной скорости объекта)

$$f_{\text{р}}(t) = \frac{2\mu}{c} L = HL,$$

здесь $H = 2\mu/c$ — код расстояния, Гц/м.

Таким образом, частота разностного сигнала пропорциональна дальности, именно она несет информацию пользователю о расстоянии до объекта. Направление на объект определяется пользователем на слух по разности амплитуд сигналов в левом и правом каналах стерео-телефонов. Центральный УЗ-приемник, имеющий более узкую диаграмму направленности, позволяет более точно определить это направление. Таким образом, устройство формирует двухмерную модель пространства (указываются угол азимута и дальность).

Опытные пользователи прибором „Kaspa“ способны не только избегать столкновений, но даже участвовать в подвижных играх.

Система „VOICE“. Конструктивно данное ТСО также представляет собой модифицированные очки. В оправе размещается скрытая миниатюрная видеокамера, ось которой направлена прямо вперед. В дужки очков вмонтированы стереофонические микрофоны и микрофон для подачи голосовых команд управления системой. Обработка сигналов производится в миниатюрном ноутбуке, расположенном обычно в рюкзаке за спиной пользователя и соединенном с „очками“ кабелем.

Изображение от видеокамеры оцифровывается, обрабатывается и преобразуется в „звуковые кадры“, передаваемые пользователю через телефоны. Принцип преобразования следующий: видеокادر разбивается на вертикальные столбцы. Каждый столбец преобразуется в сочетание (сумму) звуковых сигналов, частота каждого из которых тем выше, чем выше расположен соответствующий сегмент (пиксел) видеоизображения, а амплитуда зависит от яркости соответствующего пиксела. Иными словами, угол возвышения кодируется частотой, а яркость — громкостью сигнала, причем одновременно „озвучивается“ только один столбец. Происходит сканирование видеокadra (с периодом около 1 с) слева направо. При этом звуковые образы, соответствующие столбцам, составляющим кадр, генерируются последовательно, один за другим. В начале каждого кадра формируется короткий звуковой импульс начального отсчета (щелчок), кроме того, стереофонический сигнал формируется так, чтобы кажущееся направление на источник звука совпадало с действительным направлением на соответствующий участок поля обзора. На рис. 1 приведено упрощенное изображение некоторого видеокadra, разбитого на 8 столбцов и 8 строк и имеющего 3 градации яркости; здесь же представлена диаграмма, поясняющая, как формируется звуковой сигнал для первого столбца видеокadra.

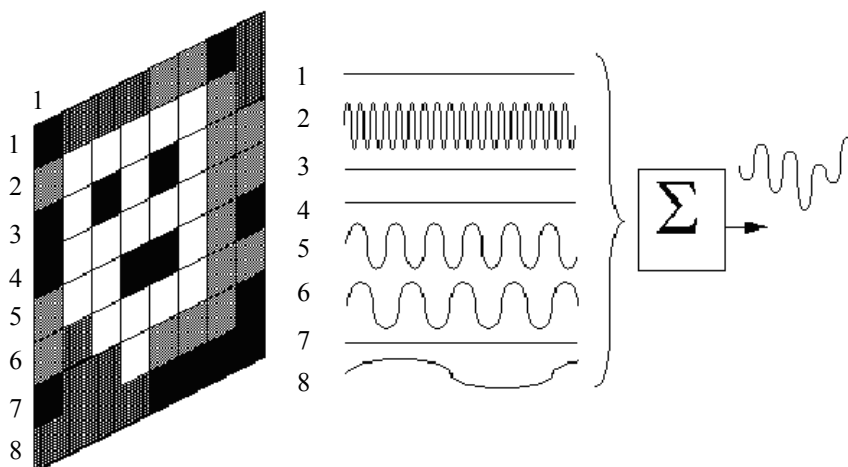


Рис. 1

По мнению многих экспертов, „VOICE“ на сегодня является одной из наиболее перспективных систем с точки зрения заложенного в ней потенциала по повышению информативности и реализации так называемого „видения с помощью звука“. Однако обеспечение надежного обнаружения препятствий и оценки расстояния до них остается проблематичным.

В настоящее время продолжают работы по усовершенствованию системы „VOICE“. В результате научного сотрудничества авторов настоящей статьи разработана и частично реализована концепция построения комбинированного ТСО на базе „VOICE“. Новая система дополнена импульсным УЗ-локатором (сонаром) для измерения дальности до ближайших объектов. Информация видеокadra предоставляется пользователю в звуковой форме через стандартные головные телефоны. Чтобы информационные сигналы сонара не влияли на

качество восприятия пользователем „звуковых кадров“ системы „VOICE“, сведения о дальности предполагается выдавать через вибрационный датчик.

Дополнительную информацию по данной разработке см. на сайте www.seeingwithsound.com в разделе „Sonar extension“.



Рис. 2

Внешний вид действующего макета специальных очков с вмонтированной скрытой видеокамерой и ультразвуковыми преобразователями, установленными на дужках, показан на рис. 2.

Практическое внедрение ТСО. Несмотря на полувековой опыт разработок различных ТСО для слепых лишь немногие из них доходят до стадии промышленного выпуска и получают широкое признание пользователей. Основными причинами являются либо недостаточно высокие потребительские качества, либо высокая цена. Последняя причина ограничивает скорость внедрения наиболее высокоинформативных ТСО. Среди эффективных, но дорогих ТСО можно назвать, например, рассмотренный выше прибор „Kaspa“ стоимостью более 3 000 долл. и лазерную трость „Lasercane“ (фирма „Nurion Industries“, США) стоимостью около 2 500 долл. Кроме того, существенной проблемой является процесс обучения пользователя. Поэтому на мировом рынке востребованы более простые приборы, такие как, например, трость „K' Sonar Cane“ („Bay Advanced Technologies Ltd“, Новая Зеландия) по цене около 600 долл. и ультразвуковой ручной детектор препятствий „Miniguide“ („GDP Research Adelaide“, Австралия), стоящий 400—500 долл.

В России опыта серийного внедрения подобных изделий до последнего времени не было. Однако в 2004—2005 гг. в БГТУ „Военмех“ им. Д. Ф. Устинова (Санкт-Петербург) проведен ряд работ, базирующихся на 15-летнем опыте научных исследований в области приборов для слепых, и начат выпуск ультразвуковой трости „Сонар-1“ для инвалидов по зрению (внешний вид трости представлен на рис. 3, а), а также ультразвукового фонаря „Поиск-01“ для служб МЧС.

а)



б)



Рис. 3

При поддержке БГТУ „Военмех“ и Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере в 2005 г. в Петербурге создано НПО „Сонар“, специализирующееся на разработке и усовершенствовании ТСО для слепых. Одна из наиболее успешных разработок этого предприятия — ультразвуковой фонарик-кулон „Сонар-5УФ“ (см. рис. 3, б), в котором информация о препятствиях представляется в виде тональных или вибрационных сигналов, по выбору пользователя (подробнее — см. на сайте www.tiflosomp.ru в разделе „Бытовая техника“). В настоящее время НПО „Сонар“ приступает к разработке электронного компаса для инвалидов по зрению.

При разработке приборов для слепых, ввиду специфики российского рынка, уделялось внимание снижению их стоимости: на конец 2007 г. цена трости „Сонар-1“ составила 6 500 руб., фонарика „Сонар-5УФ“ — 4 250 руб.

Заключение. Наиболее перспективными устройствами для слепых на ближайшие 5—10 лет представляются телевизионные ТСО, предназначенные для максимального использования слуха. Однако необходимо учитывать и присущие этим приборам ограничения. Одна из основных особенностей их применения — необходимость значительных временных затрат на обучение пользователя интерпретации звуковых сигналов, при этом конечная эффективность данных устройств зависит от пользователя не в меньшей мере, чем от качества реализации ТСО. Следует отметить, что помимо технических проблем возникает также вопрос преодоления психологического барьера. По результатам натурных испытаний различных ТСО (с участием слепых экспертов) приходится признать, что при определении оптимального способа представления информации весьма существенным остается субъективный фактор, поэтому ни одно из рассмотренных направлений развития ТСО не может претендовать на абсолютное превосходство по отношению к остальным. В этой связи с практической точки зрения представляется целесообразной организация для слепых специальных учебных групп, оснащенных ассортиментом ТСО различной сложности, где пользователь имел бы возможность осваивать навыки обращения с данными приборами, начиная с наиболее простых.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kay L. A sonar aid to enhance spatial perception of the blind: engineering design and evaluation // The Radio and Electronic Engineer. 1974. Vol. 44. P. 605—627.
2. Meijer P. B. L. An experimental system for auditory image representation // IEEE Trans. Biomedical Engineering. 1992. Vol. 39, N 2. P. 112—121.
3. Yonesawa Y. Binaural sensitivity to direction cue in an acoustic spatial sensor // Acoustica. 1986. Vol. 72. P. 140—144.

Рекомендована кафедрой
систем обработки информации
и управления БГТУ „Военмех“

Поступила в редакцию
22.11.06 г.

УДК 621.17.34

П. А. ГАЛАЙДИН

*Балтийский государственный технический университет „Военмех“ им. Д. Ф. Устинова
Санкт-Петербург*

РАСЧЕТ АКСИАЛЬНОГО ГРАДИЕНТНОГО МОДУЛЯ МАГНИТОРЕЗОНАНСНОГО ТОМОГРАФА

Рассмотрен метод расчета аксиального градиентного модуля магниторезонансного томографа, состоящего из трех градиентных систем, генерирующих линейно изменяющиеся по трем осям декартовой системы координат магнитные поля. Приведены результаты расчета и схемы градиентных систем.

Аксиальный градиентный модуль предназначен для введения в рабочем объеме томографа прямоугольной системы магнитных координат, при этом основной магнит представляет собой набор круговых обмоток. Так как частота ядерного магнитного резонанса в исследуемом образце прямо пропорциональна значению приложенного магнитного поля [1], то

при изменении индукции магнитного поля по линейному закону можно связать частоту ядерного магнитного резонанса в элементарном объеме объекта с его геометрическим положением в этой области. Поэтому для удобства кодирования и расшифровки результатов измерения магнитное поле градиентных систем должно изменяться по линейному закону. Разрешающая способность томографа зависит как от однородности поляризующего поля, создаваемого магнитной системой, так и от линейности и значения градиентных магнитных полей [2]. Таким образом, задача расчета градиентного модуля сводится к расчету трех градиентных систем (ГС), генерирующих магнитные поля с высокой линейностью градиента (порядка 1 %) вдоль осей X , Y , Z и его максимальным значением, получаемым на единицу затрачиваемой силы тока, т.е. с максимальной эффективностью системы.

ГС с аксиальной симметрией строятся из проводников в форме кругового витка или дуги. Аксиальная составляющая индукции магнитного поля кругового витка при протекании тока I определяется следующим образом [3]:

$$B_Z = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{R(R - r \cos \varphi_0) d\varphi_0}{\left[R^2 + r^2 - 2rR \cos \varphi_0 + (z - z_0)^2 \right]^{3/2}}, \quad (1)$$

где μ_0 — магнитная постоянная; R — радиус витка; r, z — радиальная и аксиальная координаты точки наблюдения; z_0 — аксиальная координата центра витка.

Выражение для аксиальной составляющей индукции магнитного поля на дуговом участке a витка с центральным углом φ получим, изменяя пределы интегрирования:

$$B_{Z,a} = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \int_0^{\varphi} \frac{R(R - r \cos \varphi_0) d\varphi_0}{\left[R^2 + r^2 - 2rR \cos \varphi_0 + (z - z_0)^2 \right]^{3/2}}. \quad (2)$$

В декартовой системе координат (рис. 1) при относительных координатах $\gamma = x/R$, $\eta = y/R$, $\varepsilon = z/R$ и $\varepsilon_0 = z_0/R$ выражение (2) принимает вид

$$B_{Z,a} = \frac{\mu_0 I}{2\pi R} \int_0^{\varphi} \frac{(1 - \gamma \cos \varphi_0 - \eta \sin \varphi_0) d\varphi_0}{\left[(\gamma - \cos \varphi_0)^2 + (\eta - \sin \varphi_0)^2 + (\varepsilon_0 - \varepsilon)^2 \right]^{3/2}}. \quad (3)$$

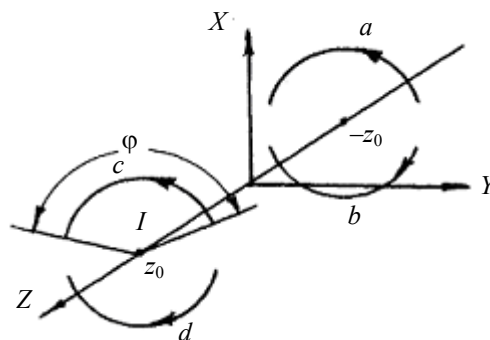


Рис. 1

Выражения для индукции магнитного поля на участках b, c и d витка, необходимой для расчета ГС, можно записать следующим образом:

$$B_{Z,b} = \frac{\mu_0 I}{2\pi R} \int_0^{\varphi} \frac{(1 + \gamma \cos \varphi_0 - \eta \sin \varphi_0) d\varphi_0}{\left[(\gamma + \cos \varphi_0)^2 + (\eta + \sin \varphi_0)^2 + (\varepsilon_0 - \varepsilon)^2 \right]^{3/2}}; \quad (4)$$

$$B_{Z,c} = \frac{\mu_0 I}{2\pi R} \int_0^\varphi \frac{(1 - \gamma \cos \varphi_0 - \eta \sin \varphi_0) d\varphi_0}{\left[(\gamma - \cos \varphi_0)^2 + (\eta - \sin \varphi_0)^2 + (\varepsilon_0 + \varepsilon)^2 \right]^{3/2}}, \quad (5)$$

$$B_{Z,d} = \frac{\mu_0 I}{2\pi R} \int_0^\varphi \frac{(1 + \gamma \cos \varphi_0 - \eta \sin \varphi_0) d\varphi_0}{\left[(\gamma + \cos \varphi_0)^2 + (\eta - \sin \varphi_0)^2 + (\varepsilon_0 + \varepsilon)^2 \right]^{3/2}}. \quad (6)$$

Токи в секциях обмоток ГС направлены таким образом, что индукция магнитного поля в центре системы равна нулю. Поэтому в разложении индукции поля в ряд Маклорена присутствуют только члены с нечетными степенями координаты, по которой создается градиент.

Системы продольного градиента создают градиент индукции вдоль продольной оси Z аксиальной системы поляризирующего магнитного поля и называются градиентными системами Z .

Для градиентной системы Z используем систему Максвелла (рис. 2) из двух витков с радиусом R и силой тока I , расположенных на расстоянии $\pm z_0$ от начала координат.

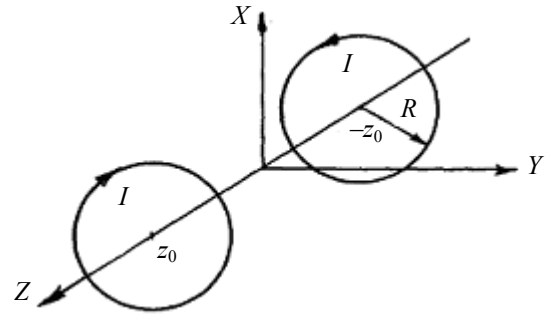


Рис. 2

Интегрируя выражение (1), для составляющей индукции кругового проводника в точке на оси Z с координатой z , получаем

$$B_Z = \frac{\mu_0 I R^2}{2 \left[R^2 + (z - z_0)^2 \right]^{3/2}}. \quad (7)$$

Разложение B_Z в ряд Маклорена по степеням z записывается как

$$B_Z(z) = 2 \left[H_1 z + H_3 z^3 + \dots + H_n z^n + \dots \right], \quad (8)$$

где $H_n = \frac{1}{n!} \partial^n B_Z / \partial z^n$ — коэффициент ряда n -го порядка.

Записанные в относительных единицах ($\varepsilon_0 = z_0/R$) выражения для коэффициентов ряда (8) имеют следующий вид:

$$H_1 = -3/2 \varepsilon_0 (1 + \varepsilon_0^2)^{-5/2},$$

$$H_3 = -5/8 \varepsilon_0 (4\varepsilon_0^2 - 3) (1 + \varepsilon_0^2)^{-9/2},$$

$$H_5 = -7/16 \varepsilon_0 (8\varepsilon_0^4 - 20\varepsilon_0^2 + 5) (1 + \varepsilon_0^2)^{-13/2}.$$

Задача синтеза градиентных систем сводится к поиску таких значений параметров ε_0 для нескольких круговых проводников, когда коэффициенты при нежелательных членах ряда (8) с 3-го и до некоторого более высокого порядка будут равны нулю.

Так, для градиентной системы Z , состоящей из одной пары обмоток, исключение члена 3-го порядка произойдет при $\varepsilon_0 = 0,866$, что является решением уравнения $H_3 = 0$. Это решение впервые было использовано Таннером в 1965 г. [4]. Диаметр области с нелинейностью градиента менее 1 % в этом случае близок к 28 % диаметра обмоток.

Компенсация членов H_3 и H_5 ряда (8) может быть произведена при использовании двух пар обмоток. Пусть градиентная система Z имеет обмотки одинакового радиуса R с силой тока I_1 и I_2 . Тогда, решив систему уравнений

$$\left. \begin{aligned} I_1 H_{31} + I_2 H_{32} &= 0; \\ I_1 H_{51} + I_2 H_{52} &= 0, \end{aligned} \right\}$$

получим значения $\varepsilon_{01} = 0,44$, $\varepsilon_{02} = 1,19$ и отношение $I_2/I_1 = 7,47$, при которых происходит исключение членов 3-го и 5-го порядков ряда (8).

Таким образом, увеличивая число пар обмоток, можно получить системы с повышенным качеством градиентного магнитного поля. В табл. 1 приведены сравнительные характеристики для градиентных систем Z различного порядка компенсации нелинейностей. Эффективность градиентной системы можно оценить по параметру $Q = B_{zc}/Iz = G_Z/I$, (мТл/м)/А (где B_{zc} — составляющая индукции магнитного поля системы вдоль оси Z , G_Z — градиент индукции поля системы) как значение градиента магнитного поля, создаваемого при силе тока в 1 А, рассчитанного для определенного значения R .

Таблица 1

Порядок компенсации	Число пар обмоток	Диаметр области с нелинейностью менее 1 %	Габаритный размер ГС	Эффективность Q , (мТл/м)/А ($R=0,1$ м)
3	1	$0,56R$	$1,74R$	2,5
5	2	$1,16R$	$2,38R$	2,2
7	3	$1,22R$	$4,12R$	1,6

Как видно из таблицы, увеличение числа пар обмоток приводит к увеличению размера области линейного градиента магнитного поля. Однако при этом происходит увеличение габаритов градиентной системы и снижение ее эффективности.

Существует возможность увеличения относительного рабочего объема ГС путем оптимизации при расчете положения проводников, например, модифицированным методом спирального координатного спуска.

Произведем оптимизацию параметров градиентной системы Z из трех пар обмоток. В качестве критерия оптимизации P выберем средний минимум отклонения градиентного поля от линейного закона в m точках рабочего объема. Примем число расчетных точек, расположенных на расчетном радиусе $R_p = 0,7R$, равным $m = 15$.

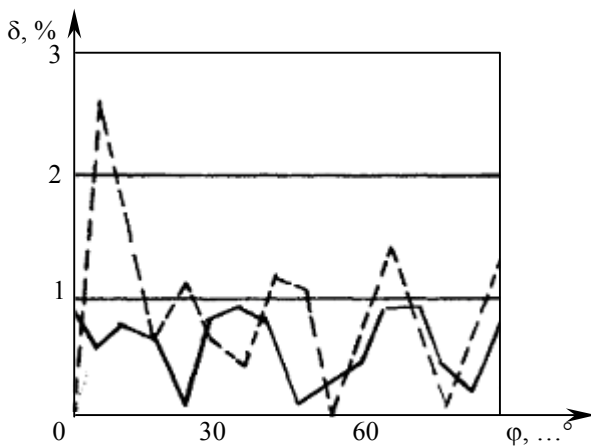


Рис. 3

В результате оптимизации получены следующие значения переменных: $\varepsilon_{01} = 0,330$, $k_1 = 1$, $\varepsilon_{02} = 0,650$, $k_2 = 1$, $\varepsilon_{03} = 1,18$, $k_3 = 12$, где k — число витков в соответствующих секциях. Сравнение погрешностей линейности поля в расчетных точках плоскости ZOX для неоптимизированной (штриховая линия) и оптимизированной (сплошная линия) градиентных систем Z представлено на рис. 3.

Конечное значение критерия оптимизации $P = 0,99\%$ свидетельствует о том, что область с погрешностью воспроизведения градиентного магнитного поля менее 1 % близка к сфере с радиусом $0,7R$. Характеристики градиентных систем Z двух типов, рассчитанные при $R = 100$ мм, $G_Z = 5$ мТл/м и одинаковом диаметре провода, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Параметр	Градиентная система	
	неоптимизи- рованная	оптимизи- рованная
Габаритный размер	4,12R	2,36R
Суммарное число витков	29,4	14
Диаметр сферы с нелинейно- стью менее 1%	1,22R	1,40R
Эффективность, (мТл/м) /А	0,63	0,74
Потребляемая мощность, Вт	80,3	27,8

Из таблицы следует, что в результате оптимизации появляется возможность увеличения рабочего объема и эффективности ГС при одновременном уменьшении ее габаритов и индуктивности за счет уменьшения числа витков обмоток.

Анализ различных вариантов этого решения показал, что размеры области с высокой линейностью градиента в пределах 60 % внутреннего диаметра сохраняются при следующих изменениях параметров: $\varepsilon_{01} = 0,320 \dots 0,340$, $\varepsilon_{02} = 0,630 \dots 0,670$, $\varepsilon_{03} = 1,10 \dots 1,20$, $k_1 = k_2 = 1$, $k_3 = 11 \dots 13$.

Для создания градиентного магнитного поля в поперечном направлении X или Y Голей [5] предложил использовать систему седлообразных обмоток. Градиентная система X состоит из четырех симметричных обмоток, каждая из которых содержит два дуговых и два линейных участка (рис. 4). ГС X и Y одинаковы по конструкции, но повернуты относительно друг друга вокруг оси Z на 90° .

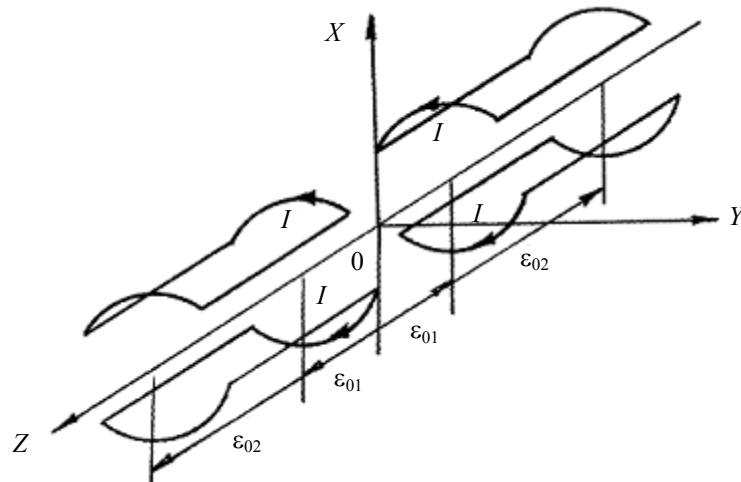


Рис. 4

При расчете таких систем используем формулы (3)—(6) для аксиальной составляющей индукции магнитного поля в произвольной точке пространства $M(x, y, z)$ от воздействия индукции на дуговых участках a, b, c, d (см. рис. 1). Обозначим расстояние по координате z от центра системы координат до дугового проводника через z_0 , половину угла раскрытия дуги — через φ_1 , радиус дуги R и протекающий в ней ток I .

Суммарное значение индукции определяется как

$$B_Z = B_{Z,a} + B_{Z,b} + B_{Z,c} + B_{Z,d}.$$

Положение дуговых участков ε_0 и величина центрального угла $2\varphi_1$ в такой градиентной системе выбраны исходя из условия равенства нулю члена 3-го порядка в разложении в ряд функции (3):

$$\frac{\partial^3 B_{Z,a}}{\partial \gamma^3} = \frac{\mu_0 I}{2\pi R} \int_0^{\varphi_1} \frac{[9(4\varepsilon_0^4 - 27\varepsilon_0^2 + 4)\cos\varphi_0 - 15(\varepsilon_0^2 - 4)\cos 3\varphi_0] d\varphi_0}{(1 + \varepsilon_0^2)^{9/2}} = 0. \quad (9)$$

Таким образом, $\varepsilon_{01} = \pm 0,39$, $\varepsilon_{02} = \pm 2,57$ и $\varphi = 120^\circ$. К недостаткам описанной градиентной системы можно отнести ее большую длину, часто превышающую габаритные размеры основной магнитной системы.

Поиску более компактных решений для построения градиентных систем X посвящена работа [6]. Возьмем в качестве источника магнитного поля дугу бесконечно тонкого соленоида. Для этого проинтегрируем по ε_0 выражения (3)—(6) и запишем функцию индукции магнитного поля в виде ряда

$$B_Z = 2\mu_0 J [G_1 x + G_3 x^3 + G_5 x^5 + \dots], \quad (10)$$

где J — линейная плотность тока в обмотке, А/м; G_i — коэффициент ряда i -го порядка.

В этом случае выражения для G_1 и G_3 , записанные в относительных единицах ($\varepsilon = z_0/R$), имеют вид

$$G_1 = \frac{\sqrt{3}}{2\pi} \varepsilon (\varepsilon^2 + 2) (1 + \varepsilon^2)^{-3/2} \Big|_{\varepsilon_{01}}^{\varepsilon_{02}}, \quad G_3 = \frac{9\sqrt{3}}{8\pi} \varepsilon (\varepsilon^2 - 4) (1 + \varepsilon^2)^{-7/2} \Big|_{\varepsilon_{01}}^{\varepsilon_{02}}.$$

На рис. 5 представлены графики функций G_1 и G_3 в диапазоне значений ε от 0 до 3. График G_3 имеет экстремумы в точках 0,39 и 2,57, что использовалось некоторыми авторами для компенсации функции (9). В рассматриваемом случае для заданной ширины обмоток l это соответствует единственному решению системы уравнений

$$\left. \begin{aligned} G_{31} = G_3(\varepsilon_2) - G_3(\varepsilon_1) &= 0; \\ G_{32} = G_3(\varepsilon_4) - G_3(\varepsilon_3) &= 0; \\ (\varepsilon_2 - \varepsilon_1)R &= l, \\ (\varepsilon_3 - \varepsilon_4)R &= l. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

На рис. 6 штриховыми линиями показано семейство векторов параметров градиентных систем, полученных при решении системы уравнений (11). Так как при малых l решение имеет известные значения 0,39 и 2,57, назовем такую систему нормальной.

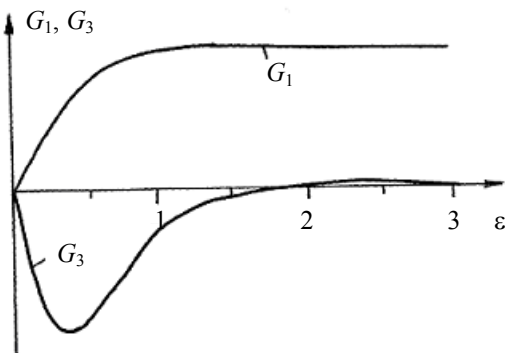


Рис. 5

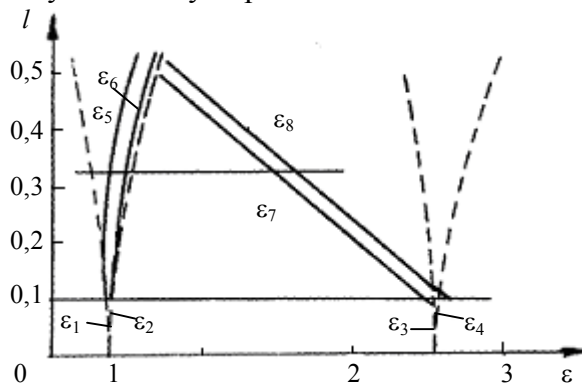


Рис. 6

Однако компенсация нежелательного градиента 3-го порядка может быть осуществлена и при других значениях переменных, если перейти к решению системы из трех уравнений:

$$\left. \begin{aligned} G_{31} + G_{32} = G_3(\varepsilon_6) - G_3(\varepsilon_5) + G_3(\varepsilon_8) - G_3(\varepsilon_7) = 0; \\ (\varepsilon_6 - \varepsilon_5) = l, \\ (\varepsilon_8 - \varepsilon_7) = l. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Так как система уравнений (12) избыточна по числу параметров, то для ее решения необходимо задать два независимых параметра, например, ширину обмоток l и полную длину градиентной системы $2\varepsilon_8$. Семейство векторов параметров ГС при $l = 0,1$ и различных значениях ε_8 представлено на рис. 6 сплошными линиями. Назовем такую систему компактной.

Сравнить эффективность двух вариантов градиентных систем можно по значениям функций G_1 :

для нормальной системы $G_{1н} = G_1(\varepsilon_2) - G_1(\varepsilon_1) + G_1(\varepsilon_4) - G_1(\varepsilon_3)$,

для компактной системы $G_{1к} = G_1(\varepsilon_6) - G_1(\varepsilon_5) + G_1(\varepsilon_8) - G_1(\varepsilon_7)$.

На рис. 7 приведена зависимость отношения $G_{1к}/G_{1н}$ от параметра ε_8 . Как видно из графика, при $\varepsilon_8 = 2,14$ эффективность компактной системы несколько больше, чем нормальной (102 %), а при уменьшении габаритного размера до $\varepsilon_8 = 1,5$ она незначительно снижается (до 94 %). Дальнейшее уменьшение габаритов градиентной системы нецелесообразно, так как ее эффективность при этом резко падает.

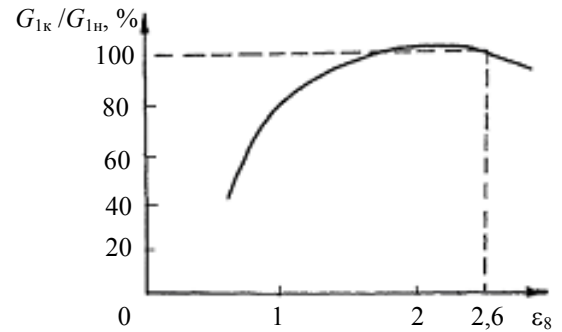


Рис. 7

Для синтеза градиентных систем более высокого порядка можно использовать описанную выше методику, заключающуюся в обнулении членов ряда (10). Однако, как показывает практика, ГС при этом имеют большие габариты и низкую эффективность.

Для улучшения характеристик системы воспользуемся методом оптимизации. Расчет градиентной системы произведем используя формулы (3)—(6). Пусть каждая из четырех обмоток состоит из n секций, расположенных на расстояниях z_{0i} от центра системы, содержащих k_i дуговых участков с радиусом R , центральным углом φ , и соединяющих их прямолинейных участков, параллельных оси Z .

Участки с обратным направлением тока расположены на расстоянии $z_{0обр}$ от центра системы и содержат число витков, равное суммарному числу витков дуговых участков.

Синтезирующее уравнение для такой градиентной системы имеет вид

$$B_{Zc} = \sum_{i=1}^n k_i \left[B_Z(\varepsilon_{0i}) - B_Z(\varepsilon_{0обр}) \right].$$

Таким образом, описываемая градиентная система имеет $2(n+1)$ независимых параметров. При использовании алгоритма многомерной оптимизации для $n = 3$ найдены значения параметров переменных: $\varepsilon_1 = 0,13$, $k_1 = 1$, $\varepsilon_2 = 0,57$, $k_2 = 1$, $\varepsilon_3 = 0,83$, $k_3 = 2$, $\varepsilon_{0обр} = 1,75$ и $\varphi = 124^\circ$, при которых область с нелинейностью градиента менее 1% максимальна. Сравнение параметров градиентных систем X двух типов приведено в табл. 3, из которой следует, что синтезированная система имеет вдвое больший относительный рабочий объем. При этом эффективность системы увеличивается в 2,7 раза, а потребляемая мощность уменьшается в 2,5 раза по сравнению с системой Голея.

Таблица 3

Параметр	Система Голя	Оптимизированная ГС
Габаритный размер	5,14R	3,50R
Число секций	1	3
Отношение токов в секциях	1:1	1:1:2
Диаметр области с нелинейностью менее 1 %	0,40R	1,0R

Анализ различных вариантов рассмотренного решения показал, что размеры области с высокой линейностью градиента в пределах 50 % внутреннего диаметра сохраняются при следующих изменениях параметров: $\varepsilon_1 = 0,10 \dots 0,15$; $\varepsilon_2 = 0,55 \dots 0,60$; $\varepsilon_3 = 0,80 \dots 0,85$; $\varepsilon_{0 \text{ обр}} = 1,60 \dots 1,90$ и $\varphi = 123 \dots 125^\circ$.

Таким образом, оптимизация параметров позволяет улучшить технические характеристики градиентного модуля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Эрнст Р., Боденхаузен Дж., Вокаун А. ЯМР в одном и двух измерениях. М.: Мир, 1990.
2. Галайдин П. А., Замятин А. И., Иванов В. А. Основы магниторезонансной томографии: Учеб. пособие. Л.: ЛИТМО, 1989.
3. Галайдин П. А. Расчет аксиальной системы продольного градиента магниторезонансного томографа // Изв. вузов. Приборостроение. 2002. Т. 45, № 3.
4. Tanner J. E. Pulsed field gradients for NMR spin-echo diffusion measurements // Rev. Sci. Instrum. 1965. Vol. 38.
5. Golay M. J. E. Field homogenizing coils for nuclear spin resonance instrumentation // At the same place. 1958. Vol. 29.
6. Галайдин П. А., Иванов В. А. Уменьшение габаритов градиентной системы магниторезонансного томографа // Изв. вузов. Приборостроение. 2002. Т. 45, № 4.

Рекомендована кафедрой
электротехники

Поступила в редакцию
20.03.07 г.

УДК 621.382

В. Ю. ХОЛКИН

Северо-Западный государственный заочный технический университет
Санкт-Петербург

МОДЕЛЬ БАРЬЕРНОГО МЕХАНИЗМА ВОЗНИКНОВЕНИЯ $1/f$ -ШУМА В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ УСТРОЙСТВАХ

Рассматривается модель возникновения $1/f$ -шума, основанная на барьерном механизме переноса заряда. Решение задачи распределения вероятности преодоления единичным носителем энергии потенциального барьера объясняет наличие пределов значения степени y в эмпирической формуле $1/f^y$.

Развитие твердотельной технологии нанoeлектронных структур и создание на их основе малошумящих приборов вновь обострило проблемы, связанные с исследованием $1/f$ -шума. Изучение электрических шумов с распределением спектральной плотности мощности, обратно пропорциональной частоте ($1/f$ -шум), началось еще в середине XX века и связано с развитием твердотельных полупроводниковых устройств [1, 2]. В маломощных низкочастотных электронных и радиоэлектронных устройствах проявление шумов было наиболее значимо,

что привело к поиску причин и природы их возникновения. Несмотря на то, что шумы такого рода наблюдают в многочисленных системах (не только электронных) и по-разному называют (фликкер-шум, токовый, контактный, избыточный и т.д.), до настоящего времени отсутствует единое мнение о природе возникновения этого явления, что затрудняет создание рабочей модели. Однако для всех случаев установлено, что спектральная плотность энергии этого шума изменяется в зависимости от частоты как $f^{-\gamma}$, где значения γ находятся в диапазоне 0,8—1,2, причем в большинстве случаев не превышает 1 [3, 4].

За последние два десятилетия накоплено достаточно большое количество данных по исследованию $1/f$ -шума в различных электронных приборах. Наиболее предпочтительными считаются версии поверхностного и объемного эффектов, проявление которых определяется конкретной системой. Однако сходство формы наблюдаемых спектров у приборов различных типов позволяет полагать, что $1/f$ -шум обусловлен одним и тем же физическим механизмом, что нашло свое отражение в эмпирическом законе Хуга [5], который непосредственно не связан с каким-либо физическим механизмом возникновения этого шума. В последние годы все большее внимание уделяется развитию математических моделей этого явления [6].

Одни из первых исследований $1/f$ -шума были проведены на поликристаллических металлических пленках [7, 8]. Возникновение шума в таких материалах связано с барьерным механизмом проводимости и обусловлено флюктуациями подвижности и проводимости по локализованным состояниям, что для таких систем наиболее вероятно.

Самой распространенной моделью $1/f$ -шума для полупроводниковых устройств является модель, основанная на захвате носителей заряда ловушками с широким интервалом времени жизни носителей [9,10]. Если считать, что такой захват подчиняется статистике Пуассона, то вызванная им модуляция принимает форму случайного сигнала, который обладает спектром рекомбинационного типа. Если имеется множество ловушек с некоторым распределением времен захвата, то общий спектр равен сумме спектров ловушек каждого типа, и эта сумма может сводиться к $1/f$ -зависимости в некотором диапазоне частот. Однако даже среди сторонников этой модели до настоящего времени ведется спор о том, является ли $1/f$ -шум объемным или поверхностным явлением.

Заслуживает внимания и квантовая модель $1/f$ -шума [11, 12], в которой носители заряда взаимодействуют с квантовым электромагнитным полем и подвергаются рассеянию на некоторых потенциальных барьерах, в результате чего могут испускать низкочастотные фотоны. Несмотря на то что энергия фотона крайне мала, она может быть достаточна для модуляции тока и вызывать $1/f$ -шум. При справедливости этой теории подобная модель позволяет установить нижний предел $1/f$ -шума в электронных приборах, если отсутствуют другие источники.

Несмотря на отсутствие общей модели, для ряда конкретных случаев, например моделирования спектров $1/f$ -шума в эпитаксиальных пленках $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ [13], было получено хорошее согласование предложенной модели с экспериментальными данными. С точки зрения решения конкретных прикладных задач нахождение частных решений, конечно же, полезно, однако не позволяет охватить все многообразие проявления $1/f$ -шума и соответственно не позволяет прогнозировать его появление в других средах при других физических явлениях.

Очевидно, что для реализации шумовых исследований необходимо уметь не только измерять соответствующие характеристики систем, но и рассчитывать их теоретически в рамках той или иной физической модели. Теоретический анализ для шумовых исследований является особенно важным, поскольку, при всех преимуществах исследовательских методов, такой анализ может дать более наглядные результаты.

В основу рассматриваемой в настоящей статье модели положено предположение, что $1/f$ -шум является результатом „барьерного эффекта“ — явления, получаемого преодолением

носителями заряда потенциального барьера. В этом случае неважно, в какой среде он возникает, но решение задачи определения зависимости $1/f$ должно находиться в области теории вероятности. Рассмотрим основные положения и математическую модель этого явления.

Перед потенциальным барьером могут находиться множество носителей. Исследуем поведение одного (рис. 1). Будем полагать, что поведение единичного носителя согласно закону больших чисел описывает поведение всей генеральной совокупности носителей в целом.

Рассмотрим единичный носитель энергии, например электрон, поведение которого характеризуется следующими факторами:

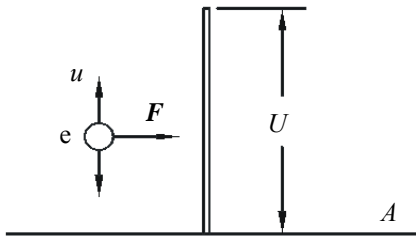


Рис. 1

— единичный носитель должен двигаться в направлении A , которое определено вектором \mathbf{F} (в случае когда единичным носителем является электрон, величина и направление вектора \mathbf{F} определяются разностью потенциалов);

— на пути движения единичного носителя в направлении A находится потенциальный барьер, высота которого определяется энергией U ;

— единичный носитель случайным образом может получить энергию u_i , накопить ее и в момент, когда $\sum u_i = u > U$, преодолеть потенциальный барьер.

Очевидно, что вероятность преодоления электроном энергии потенциального барьера зависит от времени: чем больше времени прошло с начала накопления энергии, тем более вероятно, что единичный носитель преодолеет потенциальный барьер. Учитывая большое количество носителей, участвующих в процессе, а также постоянное их возобновление (на месте единичного носителя, преодолевшего потенциальный барьер, появляется другой), получим непрерывный набор периодически повторяющихся импульсов, размер которых будет определяться вероятностью преодоления единичным носителем потенциального барьера в зависимости от времени начала накопления энергии. Закономерность процесса обуславливается скоростью накопления энергии носителем и характером потенциального барьера. Случайность процесса, позволяющего рассматривать его как шум, определяется хаотичным (случайным) получением энергии.

Будем решать задачу распределения плотности вероятности преодоления единичным носителем энергии потенциального барьера расчетным путем, используя формулы теории вероятности. При этом интервалы времени Δt_n , по которым будут определяться плотности вероятностей, рассчитываются следующим образом:

$$\Delta t_1 = \Delta t_e, \quad \Delta t_2 = \Delta t_1 + \Delta t_e, \quad \Delta t_3 = \Delta t_2 + \Delta t_e, \quad \dots, \quad \Delta t_n = \Delta t_{n-1} + \Delta t_e,$$

где Δt_e — единичный интервал времени.

При этом значение Δt_n определяет частоту следования импульсов как

$$f_n = 1/\Delta t_n. \quad (1)$$

Если вероятность $P(\Delta t_e)$ того, что единичный носитель преодолеет потенциальный барьер ($u > U$) через интервал времени Δt_e , равна ξ , а начальный интервал $\Delta t_1 = \Delta t_e$, то соответственно

$$P(\Delta t_1) = P(\Delta t_e) = \xi.$$

Вероятность того, что носитель заряда преодолеет потенциальный барьер при $\Delta t_2 = \Delta t_1 + \Delta t_e$, будет определяться по формуле суммы вероятностей:

$$P(\Delta t_2) = P(\Delta t_1) + P(\Delta t_e) - P(\Delta t_1)P(\Delta t_e)$$

или

$$P(\Delta t_n) = P(\Delta t_{n-1}) + P(\Delta t_e) - P(\Delta t_{n-1})P(\Delta t_e). \quad (2)$$

При этом каждому интервалу времени Δt_n формально соответствует частота, определенная согласно формуле (1). Тогда выражение (2) примет вид

$$P(f_n) = P(\Delta f_{n-1}) + P(\Delta f_e) - P(\Delta f_{n-1})P(\Delta f_e). \quad (3)$$

Следует иметь в виду, что для конкретного случая $P(\Delta f_e) = P(\Delta t_e) = \xi$ — постоянная величина, и, используя выражение (3), можно построить расчетную графическую зависимость. При этом наиболее важным является изменение плотности вероятности $P(f_n)$ в зависимости от изменения вероятности $P(\Delta t_n)$.

В результате компьютерных расчетов, проведенных по данной модели, были получены зависимости (рис. 2), анализ которых показал, что начиная со значения вероятности $P(\Delta t_e) = 0,01$ и меньше на графике формируется ярко выраженная зависимость $1/f$.

Результаты сравнительных расчетов показали, что отличие зависимостей, рассчитанных по предложенной математической модели (начиная с $P(\Delta t_e) = 0,2$ и далее), и зависимостей, рассчитанных по формуле $1/f^y$, незначительное и составляет сотые доли процента.

Предлагаемая модель позволяет объяснить наличие пределов степени y ($y \approx 0,8 \dots 1,2$) в эмпирической формуле $1/f^y$, которые обусловлены ограничением кривизны полученных графических зависимостей. Как видно из рис. 2, ограничение слева находится в области $P(\Delta t_e) = 0,2$. Это предельное значение, при котором в зависимости $1/f^y$ значение $y = 0,77$. Отличие от хорошо известных экспериментальных результатов [3, 4] составляет 0,03. Учитывая, что значение y оценено с определенной погрешностью, можно считать согласование экспериментальных данных с полученными расчетными хорошим. Ограничения справа возникают при начальном значении $P(\Delta t_e) = 10^{-10}$, далее зависимость практически не изменяется, что соответствует $y = 1$.

Отличие значений предела степени y справа от экспериментальных данных, в которых y может достигать значений 1,2, объясняется наличием нескольких источников шума, что, безусловно, должно влиять на форму эмпирических зависимостей. При этом следует иметь в виду, что по данным большинства экспериментов y обычно близко к 1. Таким образом, данные, рассчитанные по предложенной модели, учитывающей вероятность преодоления носителем заряда потенциального барьера, хорошо согласуются с экспериментальными и объясняют наличие как самой зависимости $1/f$ -шума, так и пределов степени y . Природа барьера не имеет особого значения — это могут быть структурный или примесный дефект, неоднородность, граница раздела и др.

Отличие значений предела степени y справа от экспериментальных данных, в которых y может достигать значений 1,2, объясняется наличием нескольких источников шума, что, безусловно, должно влиять на форму эмпирических зависимостей. При этом следует иметь в виду, что по данным большинства экспериментов y обычно близко к 1. Таким образом, данные, рассчитанные по предложенной модели, учитывающей вероятность преодоления носителем заряда потенциального барьера, хорошо согласуются с экспериментальными и объясняют наличие как самой зависимости $1/f$ -шума, так и пределов степени y . Природа барьера не имеет особого значения — это могут быть структурный или примесный дефект, неоднородность, граница раздела и др.

В заключение можно высказать предположение, что зависимость $1/f^y$ не является основополагающей: это подобранная эмпирическим путем формула, описывающая частное проявление „барьерного эффекта“ (см. рис. 2), т.е. вероятностный (случайный) процесс преодоления носителями потенциального барьера и ведет к появлению флуктуаций шума. При этом неважно, где возник барьерный эффект — на поверхности или в объеме полупроводниковой структуры. При определенных условиях (которые определяются типом барьера, т.е. значением вероятности преодоления его единичным носителем) частотные зависимости могут быть с определенной степенью точности описаны зависимостью $1/f^y$.

Рассмотрим также некоторые проявления $1/f$ -шума, которые были труднообъяснимы до появления барьерной модели. К таковым можно отнести, например, проявление $1/f$ -шума в металлах и других поликристаллических материалах, включая металлокерамические резисторы, а также в металлических пленках, широко используемых в устройствах микроэлектроники [3].

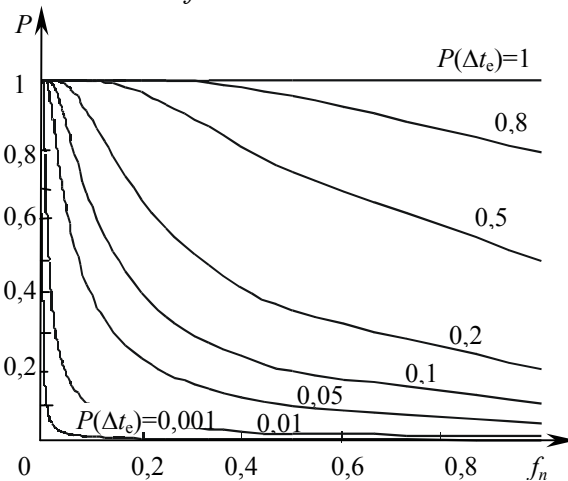


Рис. 2

Очевидно, что микрокристаллическая структура этих объектов приводит к повышенной концентрации примеси на поверхности зерна и образованию межкристаллитных барьеров, которые необходимо преодолевать носителям тока. Эта модель хорошо объясняет и сильную температурную зависимость мощности $1/f$ -шума в металлических пленках.

Основным достоинством барьерной модели следует считать не только объяснение граничных параметров γ , но и возможность использовать $1/f$ -шум как информативный параметр надежности электронных изделий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ван дер Зил А. Флуктуационные явления в полупроводниках / Пер. с англ.; Под ред. Ф. В. Бункина. М.: Изд-во иностр. лит., 1961. 232 с.
2. Ван дер Зил А. Шум при измерениях / Пер. с англ.; Под ред. А. К. Нарышкина. М.: Мир, 1979. 292 с.
3. Букингом М. Шумы в электронных приборах и системах: Пер. с англ. М.: Мир, 1986. 399 с.
4. Лукьянчикова Н. Б. Флуктуационные явления в полупроводниках и полупроводниковых приборах. М.: Радио и связь, 1990. 295 с.
5. Hoog F. N. $1/f$ -noise // Physica. 1976. Vol. 83. P. 14—23.
6. Kaulakys B., Ruuseckas J. Stochastic nonlinear differential equation generating $1/f$ -noise // Phys. Rev. E. 2004. Vol. 70 (2).
7. Clarke J., Voss R. $1/f$ -noise from thermal fluctuation in metal films // Phys. Rev. Lett. 1974. Vol. 34. P. 24—27.
8. Dutta P., Eberhard J., Horn P. $1/f$ -noise in metal films: the role of the substrate // Solid State Communication. 1978. Vol. 27. P. 1389—1391.
9. Van der Ziel A. Flicker noise in electronic devices // Advances in Elect. and Phys. 1979. Vol. 49. P. 225—297.
10. Voss R. F. $1/f$ -noise and percolation in impurity bands in inversion layers // J. Phys. C. 1978. Vol. 11. P. L924—L926.
11. Handel P. H. Quantum theory of $1/f$ -noise // Phys. Lett. 1975. Vol. 53A. P. 438—440.
12. Kiss L. S., Heszler P. An exact proof of the invalidity of „Handel’s quantum $1/f$ -noise model“, based on quantum electrodynamics // J. Phys. C: Solid State Phys. 1986. Vol. 19. P. L631—L633.
13. Берзин А. А., Бобыль А. В., Дедоборец И. А. и др. Моделирование спектров $1/f$ -шума в эпитаксиальных пленках $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ // ФТТ. 1999. Т. 41.

Рекомендована кафедрой
технологии и дизайна
радиоэлектронной техники

Поступила в редакцию
15.01.07 г.

ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.396.965.8

А. С. МАЧИХИН

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана

АВТОМАТИЧЕСКОЕ ВОССТАНОВЛЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ, ИСКАЖЕННЫХ ПРЯМОЛИНЕЙНЫМ РАВНОМЕРНЫМ СМАЗОМ

Рассматривается проблема восстановления смазанных изображений. Предложен метод автоматической оценки параметров прямолинейного равномерного смаза. Оценка производится на основе анализа искаженного изображения при отсутствии априорной информации об условиях его регистрации и параметрах оптико-электронной системы. Приведены результаты апробации метода на реальных изображениях.

Введение. Построение любого изображения сопровождается искажениями, которые вносят все звенья формирующей его оптико-электронной системы (ОЭС). Помимо линейных и шумовых искажений, свойственных реальным физическим устройствам, при регистрации изображения проявляются дополнительные факторы, негативно влияющие на его качество.

Один из таких факторов — скоростной сдвиг (смаз) изображения, причиной возникновения которого является относительное перемещение объекта и ОЭС в процессе экспонирования (в дальнейшем, не нарушая общности, будем говорить о движущемся объекте относительно неподвижной ОЭС). Действие этого фактора проявляется в наложении различных участков изображения, расположенных вдоль траектории перемещения. Восприятие и анализ смазанных изображений затрудняются, а эффективность их автоматической обработки значительно снижается.

Устранение смаза является разновидностью задачи восстановления изображения, которая формулируется как задача воссоздания изображения $G(x, y)$, зарегистрированного ОЭС при отсутствии смаза, по наблюдаемому смазанному изображению $G_{см}(x, y)$.

Функцию $G_{см}(x, y)$ можно представить как свертку функции $G(x, y)$ и функции смаза $H_{см}(x, y)$ изображения точечного объекта, называемой далее функцией смаза (ФС):

$$G_{см}(x, y) = G(x, y) \otimes H_{см}(x, y) + N(x, y), \quad (1)$$

где \otimes — обозначение свертки, $N(x, y)$ — аддитивный шум записи.

Как показано в работе [1], для получения удовлетворительных результатов при использовании большинства методов восстановления изображений необходимо наличие априорной информации о характеристиках искажения и шума. При отсутствии такой информации эти характеристики оценивают непосредственно на основе анализа искаженного изображения.

Возможности оценивания характеристик шума как на основе экспериментальных исследований ОЭС, так и анализа искаженного изображения изложены в работах [1, 2]. Поэтому основной проблемой автоматического восстановления изображений является определение ФС. Известные методы не позволяют эффективно оценивать параметры смаза в автоматическом режиме. По этой причине, как правило, даже в случае прямолинейного равномерного смаза ФС определяют на основании визуального анализа искаженного изображения.

В настоящей статье рассматривается метод автоматической оценки ФС в случае прямолинейного равномерного смаза на основе анализа искаженного изображения при отсутствии априорной информации об условиях его регистрации и параметрах ОЭС.

Исследование изображения, искаженного прямолинейным равномерным смазом. В пространственно-частотной (ПЧ) области соотношение (1) при отсутствии шума преобразуется к виду

$$\tilde{G}_{\text{см}}(v_x, v_y) = \tilde{G}(v_x, v_y) \tilde{H}_{\text{см}}(v_x, v_y), \quad (2)$$

где $\tilde{G}_{\text{см}}(v_x, v_y)$, $\tilde{G}(v_x, v_y)$, $\tilde{H}_{\text{см}}(v_x, v_y)$ — ПЧ-спектры (ПЧС) функций $G_{\text{см}}(x, y)$, $G(x, y)$ и $H_{\text{см}}(x, y)$ соответственно.

С другой стороны, формирование смазанного изображения можно описать интегральным уравнением [3]

$$G_{\text{см}}(x, y) = \frac{1}{T} \int_0^T G(x - x_0(t), y - y_0(t)) dt, \quad (3)$$

где T — продолжительность экспонирования; $x_0(t)$, $y_0(t)$ — зависимости, определяющие закон движения изображения объекта (ДИО).

Осуществив переход в ПЧ-область и несложные преобразования, выражение (3) можно записать следующим образом:

$$\tilde{G}_{\text{см}}(v_x, v_y) = \frac{1}{T} \tilde{G}(v_x, v_y) \int_0^T \exp(-i2\pi(v_x x_0(t) + v_y y_0(t))) dt. \quad (4)$$

Из уравнений (2) и (4) следует, что ПЧС ФС определяется как

$$\tilde{H}_{\text{см}}(v_x, v_y) = \frac{1}{T} \int_0^T \exp(-i2\pi(v_x x_0(t) + v_y y_0(t))) dt. \quad (5)$$

Используя обратное преобразование Фурье, получаем выражение для ФС:

$$H_{\text{см}}(x, y) = \frac{1}{T} \int_0^T \delta(x - x_0(t), y - y_0(t)) dt, \quad (6)$$

где $\delta(x, y)$ — дельта-функция.

В случае прямолинейного равномерного смаза закон ДИО для цифрового изображения описывается уравнениями

$$x_0(t) = v_x t; \quad y_0(t) = v_y t, \quad (7)$$

где v_x , v_y — проекции вектора v скорости движения изображения объекта на координатные оси, пиксел в секунду (пк/с).

Подставляя уравнения (7) в формулу (5), получаем

$$\tilde{H}_{\text{см}}(v_x, v_y) = \frac{1}{T} \int_0^T \exp(-i2\pi(v_x v_x + v_y v_y)t) dt, \quad (8)$$

откуда после преобразований имеем

$$\tilde{H}_{\text{см}}(v_x, v_y) = \text{sinc}(\pi(v_x v_x + v_y v_y)T) \exp(-i\pi(v_x v_x + v_y v_y)T). \quad (9)$$

Обозначая проекции траектории смаза на координатные оси как $l_x = v_x T$, $l_y = v_y T$ (траектория смаза представляет собой отрезок прямой линии), преобразуем выражение (9) к виду

$$\begin{aligned} \tilde{H}_{\text{см}}(v_x, v_y) &= \text{sinc}\left(\pi(v_x l_x + v_y l_y)\right) \exp\left(-i\pi(v_x l_x + v_y l_y)\right) = \\ &= \text{sinc}\left(\pi l(v_x \cos \theta + v_y \sin \theta)\right) \exp\left(-i\pi l(v_x \cos \theta + v_y \sin \theta)\right), \end{aligned} \quad (10)$$

где $l = \sqrt{l_x^2 + l_y^2}$; $\theta = \arctg(l_y/l_x)$ — угол, образуемый линией смаза с горизонтальной осью.

Так как далее речь будет идти о восстановлении цифрового изображения $G_{\text{см}}(m, n)$ размером $M \times N$, запишем выражение (10) в дискретном виде:

$$\begin{aligned} \tilde{H}_{\text{см}}(m, n) &= \text{sinc}\left(\pi\left(\frac{m}{M}l_x + \frac{n}{N}l_y\right)\right) \exp\left(-i\pi\left(\frac{m}{M}l_x + \frac{n}{N}l_y\right)\right) = \\ &= \text{sinc}\left(\pi l\left(\frac{m}{M}\cos \theta + \frac{n}{N}\sin \theta\right)\right) \exp\left(-i\pi l\left(\frac{m}{M}\cos \theta + \frac{n}{N}\sin \theta\right)\right). \end{aligned} \quad (11)$$

На рис. 1 представлены примеры искажений реального цифрового изображения при различных значениях l_x , l_y , l и θ (a — неискаженное изображение, b — смазанное).

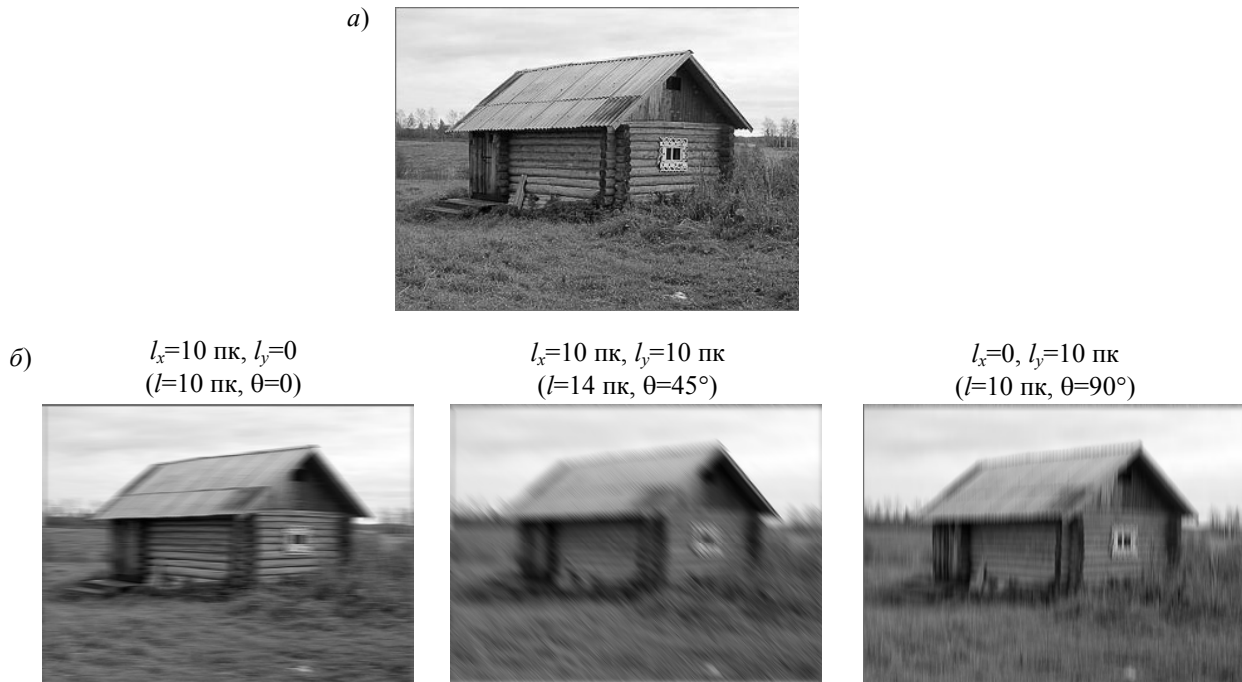


Рис. 1

Исследование пространственно-частотного спектра искаженного изображения. Из выражения (11) следует, что функция $\tilde{H}_{\text{см}}(m, n)$, а следовательно, и $H_{\text{см}}(m, n)$ в случае прямолинейного равномерного смаза полностью определяется двумя параметрами: l_x и l_y или l и θ . Поэтому задачу автоматической оценки ФС можно рассматривать как задачу определения этих параметров.

Как следует из выражений (9)—(11) и анализа рис. 1, ПЧС ФС имеет sinc-образный вид. Экспоненциальный множитель выполняет, главным образом, нормировочную функцию. Нули функции $\tilde{H}_{\text{см}}(m, n)$ расположены на прямых (см. рис. 2), уравнения которых имеют вид

$$\frac{m_0^k}{M} l_x + \frac{n}{N} l_y = k, \quad (12)$$

где k — произвольное натуральное число; ограничение значения k зависит от размеров изображения и параметров смаза.

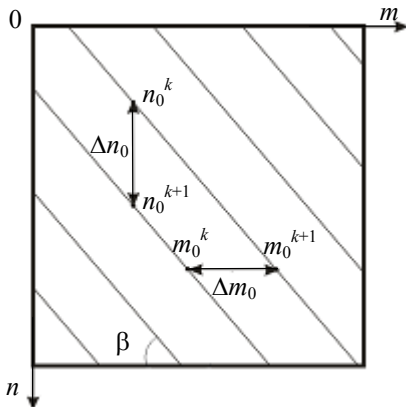


Рис. 2

Перепишем уравнение (12) для k -й прямой:

$$m_0^k(n) = -\frac{M}{N} \frac{l_y}{l_x} n + \frac{M}{l_x} k. \quad (13)$$

Из выражений (12) и (13) видно, что положение нулей ПЧС ФС определяется размерами изображения и параметрами смаза. Это дает основание утверждать, что, определив положение нулей этой функции, можно полностью восстановить ее вид.

Рассмотрим один из вариантов определения искоемых параметров l_x и l_y . Для этого выберем произвольную n -строку массива значений ПЧС ФС и найдем вдоль нее расстояние между двумя любыми соседними нулями m_0^k и m_0^{k+1} :

$$\Delta m_0 = m_0^{k+1} - m_0^k = \left(-\frac{M}{N} \frac{l_y}{l_x} n + \frac{M}{l_x} (k+1) \right) - \left(-\frac{M}{N} \frac{l_y}{l_x} n + \frac{M}{l_x} k \right) = \frac{M}{l_x}. \quad (14)$$

Проведя аналогичные рассуждения для второй координаты, получим

$$\Delta n_0 = N/l_y. \quad (15)$$

Из выражений (14) и (15) следует, что искоемые параметры, определяющие вид $\tilde{H}_{\text{см}}(m, n)$, могут быть найдены как

$$l_x = \frac{M}{\Delta m_0}, \quad l_y = \frac{N}{\Delta n_0}.$$

Согласно уравнению (2) нули функции $\tilde{H}_{\text{см}}(m, n)$ являются нулями ПЧС смазанного изображения. Таким образом, по спектру изображения, искаженного прямолинейным равномерным смазом, теоретически возможно определить ПЧС ФС, а следовательно, и ФС. Эта идея положена в основу предлагаемого в настоящей статье метода автоматической оценки $H_{\text{см}}(m, n)$ по смазанному изображению и является развитием описанного в работе [4] метода нулей спектра.

Алгоритмическая реализация метода. Рассмотренная методика определения ПЧС ФС до сих пор никак не учитывала аддитивный шум записи. Как видно из выражения (1), вследствие наличия шума нули функции $\tilde{H}_{\text{см}}(m, n)$ могут не являться нулями функции $\tilde{G}_{\text{см}}(m, n)$. Если характеристики шума известны, его можно учесть при поиске нулей, общих для $\tilde{H}_{\text{см}}(m, n)$ и $\tilde{G}_{\text{см}}(m, n)$. В случае когда априорная информация о характере шума отсутствует, его уровень оценивают по однородным участкам изображения [1].

Помимо шума, еще одним фактором, осложняющим реализацию предлагаемого метода, является цифровое представление изображения. Дискретизация и квантование приводят к тому, что ПЧС смазанного изображения не имеет точных нулей, а лишь принимает значения, близкие к нулевым. Однако, несмотря на указанные проблемы, практически всегда в ПЧС искаженного изображения удастся выделить характерную картину упорядоченного расположения нулей. Чтобы продемонстрировать это, построим бинаризирующую функцию вида

$$D(m, n) = \begin{cases} 0, & \text{если } |\tilde{G}_{\text{см}}(m, n)| \leq K; \\ 1, & \text{если } |\tilde{G}_{\text{см}}(m, n)| > K, \end{cases} \quad (16)$$

где K — порог бинаризации.

Применение формулы (16) обеспечивает возможность разработки алгоритма автоматического поиска в ПЧС смазанного изображения прямых, образуемых нулями, и определения по их положению параметров смаза. Такой алгоритм был программно реализован и апробирован на реальных изображениях.

На первом этапе определяется угол β , образуемый искомыми прямыми с горизонтальной осью (см. рис. 2).

На втором этапе с использованием найденного среднего значения $\bar{\beta}$ определяется положение искоемых прямых. Прямая, обнаруживаемая на большинстве изображений, считается окончательным решением.

Далее, с учетом известного положения одной прямой составляется ее уравнение, из которого на основе выражения (13) определяются искомые параметры l_x и l_y .

Восстановление изображений. На рис. 3, а, б представлен пример восстановления смазанного изображения (а) размером 262×161 пк при отсутствии априорной информации о параметрах ОЭС и условиях регистрации изображения. Параметры смаза оценивались полностью автоматически по разработанному алгоритму и составили $l_x = 10,7$ пк и $l_y = 4,5$ пк, тогда как их реальные значения равны 10 и 4 пк соответственно. Восстановление производилось с помощью частотного фильтра, реализующего фильтрацию Тихонова [1]:

$$H(v_x, v_y) = \frac{\tilde{H}_{\text{см}}^*(v_x, v_y)}{|\tilde{H}_{\text{см}}(v_x, v_y)|^2 + \alpha Q(v_x, v_y)},$$

где параметр регуляризации $\alpha = 0,005$.

Суммарное время, потребовавшееся на оценку параметров смаза и восстановление изображения, составило 4 с.

а)



б)



Рис. 3

Заключение. Предложенный метод автоматической оценки параметров прямолинейного равномерного смаза обладает рядом важных преимуществ, а именно:

- обеспечением полной автоматизации;
- отсутствием необходимости в априорной информации об условиях регистрации изображения и параметрах формирующей его ОЭС;
- высокой скоростью вычислений.

Использование рассмотренного метода позволяет расширить возможности современных систем обработки и распознавания изображений. При незначительной доработке, не затрагивающей сути метода, и оптимизации вычислений возможно его применение в режиме, близком к режиму реального времени.

Дальнейшим развитием метода нулей спектра может быть решение задачи оценки функции смаза в случае более сложного закона движения изображения объекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Василенко Г. И., Тараторин А. М. Восстановление изображений. М.: Радио и связь, 1986.
2. Колочкин В. Я., Мачихин А. С. Модифицированный итерационный алгоритм восстановления изображений // Вестн. МГТУ. Сер. Приборостроение. 2007. № 1. С. 114—121.
3. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2005.
4. Бейтс Р., Мак-Доннел М. Восстановление и реконструкция изображений. М.: Мир, 1989.
5. Шапиро Л., Стокман Д. Компьютерное зрение. М.: Бином. Лаборатория знаний, 2006.

Рекомендована кафедрой
лазерных и оптико-электронных систем

Поступила в редакцию
06.04.07 г.

УДК 531.717; 681.518.3.08

Г. Д. ФЕФИЛОВ

*Санкт-Петербургский государственный университет
информационных технологий, механики и оптики*

СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОЙ ВЕСОВОЙ ФУНКЦИИ И МЕТОДЫ ЕЕ РЕАЛИЗАЦИИ В ЛАЗЕРНОЙ ДИФРАКТОМЕТРИИ МИКРООБЪЕКТОВ

Описывается методика синтеза весовой функции, предназначенной для оптимального преобразования измерительного сигнала в лазерной дифрактометрии микрообъектов. Рассматриваются оригинальные методы пространственно-временной фильтрации, с помощью которых оптимальная весовая функция реализуется с заданной точностью.

В лазерной дифрактометрии одним из основных способов получения измерительной информации о контролируемом линейном размере микрообъекта является измерение линейного или углового размера боковых максимумов дифракционной картины Фраунгофера, которая возникает в фокальной плоскости фурье-объектива, при облучении контролируемого объекта пучком лазерного излучения. Для измерения линейного размера (далее ограничимся просто словом „размер“) боковых максимумов дифракционная картина сканируется и преобразуется во временной электрический сигнал $U(t)$, описывающий распределение интенсивности в ней. Измерительная информация о размере объекта определяется периодом $T_0 = 1/\omega_0 = \lambda f / 2\pi aV$ сигнала $U(t)$, который прямо пропорционален размеру бокового максимума дифракционной картины, где ω_0 — частота осцилляции сигнала $U(t)$; λ — длина волны излучения лазера; f — фокусное расстояние фурье-объектива; a — размер контролируемого объекта; V — скорость сканирования. Преобразование дифракционной картины во временной электрический сигнал с последующим получением измерительной информации о размере объекта с погрешностью измерения 5—0,5 % вследствие быстро уменьшающейся интенсивности максимумов дифракционной картины представляет непростую техническую задачу [1].

Рассмотрим на примере дифракционной картины Фраунгофера объекта круглой формы фурье-спектр функции $U(t) = [2J_1(\omega_0 t) / \omega_0 t]^2$, где J_1 — функция Бесселя I рода, описывающей распределение интенсивности в дифракционной картине, и фурье-спектр ограниченного во времени сигнала $U(t)$, получаемого при сканировании дифракционной картины.

Фурье-спектр функции $U(t) = [2J_1(\omega_0 t)/\omega_0 t]^2$, существующей в интервале $\pm\infty$ независимой текущей переменной t , ограничен на частоте $\pm\omega_0 = 2\pi aV/\lambda f$. В первом приближении фурье-спектр функции $U(t)$ имеет вид равнобедренного треугольника с максимум на частоте $\omega = 0$ [2].

На практике для получения измерительной информации о размере объекта сканированию и преобразованию во временной электрический сигнал $U(t)$ подлежит фрагмент дифракционной картины, включающий в себя часть центрального дифракционного максимума и от одного до нескольких прилегающих к нему боковых максимумов. Фурье-спектр

$$S(j\omega) = \int_0^{\infty} \left[\frac{J_1(\omega_0 t)}{\omega_0 t} \right]^2 \exp(j\omega t) dt$$

ограниченного во времени сигнала $U(t)$ обладает бесконечной шириной, при этом амплитуда спектральной составляющей на частоте ω_0 отлична от нуля (рис. 1). Устройства преобразования сигнала, обладая ограниченной полосой пропускания, передают часть спектра, поэтому целесообразно определить практическую ширину спектра сигнала, используемого в дифрактометрии. В основу одного из способов ее вычисления положен энергетический критерий, определяющий, что практическая ширина спектра сигнала является областью частот, в пределах которой сосредоточена подавляющая часть энергии сигнала (99 % от полной энергии) [3]. Согласно равенству Парсеваля энергия

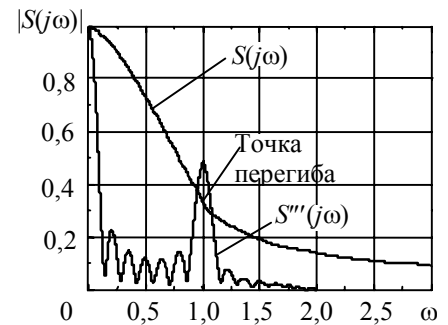


Рис. 1

сигнала представляется в виде суммы бесконечно малых слагаемых $\frac{1}{\pi} [S(\omega)]^2 d\omega$, эквивалентных бесконечно малым участкам частотного спектра [4]. Тогда энергия сигнала, сосредоточенная в полосе частот от 0 до ω_n , выражается функцией $W_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{\omega_n} [S(\omega)]^2 d\omega$. Относительное значение энергии W_n сигнала определяется из выражения

$$L_{S(j\omega)}(\omega) = \frac{W_n}{W_0} 100\% = \frac{\int_0^{\omega_n} [S(\omega)]^2 d\omega}{\int_0^{\infty} [S(\omega)]^2 d\omega} 100\%,$$

где W_0 — полная энергия сигнала.

Как видно из приведенного выражения, практическая ширина спектра сигнала $U(t)$ в десятки раз превосходит значение частоты ω_0 . Энергия сигнала, распределенная в спектре в диапазоне частот от 0 до ω_0 , составляет менее 50 % от полной энергии, а в диапазоне частот от 0 до $39\omega_0$ достигает 99 %. Это указывает на избыточность заключенной в сигнале $U(t)$ информации и неэффективность фильтрации помех традиционными полосовыми фильтрами за время, сравнимое с периодом сигнала $U(t)$ (фильтры представляют собой пассивные или активные LRC-цепи) [5].

Для эффективного подавления помех и достижения высокого метрологического уровня измерения размера дифракционного максимума необходимо выполнить функциональное преобразование получаемого измерительного сигнала в пространственной или временной области в целях сужения практической ширины его спектра при условии сохранения измерительной информации. Функциональное преобразование сигнала может быть выполнено

с помощью фильтра с конечной импульсной характеристикой (КИХ-фильтр), который осуществляет свертку входного сигнала $U(u, t)$ и весовой функции $g(u, t)$, здесь u — независимая текущая переменная (пространственная координата или время). Функция $g(u, t)$ определяет веса, с которыми входят в выходной сигнал $U_g(u, t) = U(u, t) \otimes g(u, t)$ КИХ-фильтра соответствующие значения входного сигнала $U(u, t)$. При этом осуществляется целенаправленное изменение спектра выходного сигнала $U_g(u, t)$, равного произведению спектра входного сигнала и импульсной характеристики цепи (весовой функции) [5].

На этапе синтеза оптимальной весовой функции $g(u, t)$ воспользуемся следующими критериями:

- полезный измерительный сигнал выделен из регистрируемой дифракционной картины, при этом сокращена избыточность информации;
- ширина спектра сигнала должна занимать самую узкую область частот.

Характерной особенностью спектра $S(j\omega)$ является точка перегиба в огибающей спектра амплитуд на частоте ω_0 (см. рис. 1). В данной точке производные огибающей имеют локальные экстремумы. С учетом свойства кривой, имеющей точку перегиба, и n -кратного дифференцирования спектра $S(j\omega)$ выполняется целенаправленное преобразование спектра, в результате которого его практическая ширина сужается до $3\omega_0$, повышается информативность получаемых спектральных признаков и сокращается избыточность сигнала. На рис. 1 показан спектр $S(j\omega)$ и его третья производная — спектр $S'''(j\omega)$, имеющий два ярко выраженных максимума: на нулевой частоте и на частоте ω_0 .

Связь между преобразованием спектра $S(j\omega)$ в результате его n -кратного дифференцирования и видоизменением сигнала, соответствующего вновь образованному спектру $S'''(j\omega)$, определяет свойство преобразования Фурье — „дифференцирование по частоте“ [6]:

$$\frac{d^z S(j\omega)}{d\omega^z} \xrightarrow{F} u^z I(u),$$

где F — операторный символ преобразования Фурье, $I(u)$ — анализируемая функция, z — порядок дифференцирования спектра.

В результате трехкратного дифференцирования спектра $S(j\omega)$ получим сигнал

$$U_g(t) = g(t) \otimes U(t) = (\omega_0 t)^3 \otimes U_0 [J_1(\omega_0 t) / \omega_0 t]^2 \cong U_0 \sin^2(\omega_0 t).$$

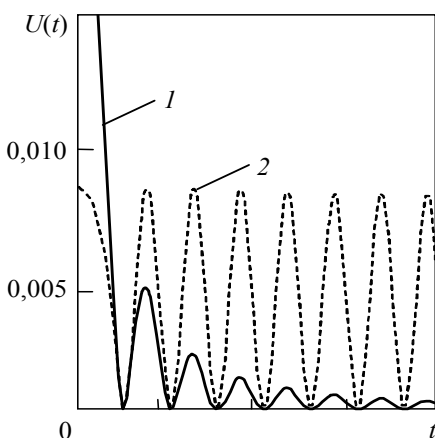


Рис. 2

Каждый период сигнала $U_g(t)$ прямо пропорционален размеру соответствующего дифракционного максимума, а амплитуда переменной составляющей сигнала $U_g(t) \cong U_0 \sin^2(\omega_0 t)$ практически выравнена. На рис. 2 представлен график, характеризующий сигнал, получаемый при сканировании дифракционной картины (кривая 1), и сигнал, возникающий на выходе КИХ-фильтра (кривая 2).

Функция $g(u, t) = (u, t)^3$ является оптимальной весовой функцией для преобразования сигнала, получаемого при регистрации дифракционной картины объекта круглой формы. Аналогичным образом получается весовая функция

$g(u, t) = (u, t)^2$ для преобразования дифракционной картины протяженных объектов или объектов прямоугольной формы.

Оптимальная весовая функция $g(u, t)$ может быть реализована в пространственной или временной области прохождения сигнала. В пространственной области весовая функция $g(u, t)$ реализуется с помощью методов амплитудной или бинарной оптической фильтрации, которые теоретически позволяют выполнить требуемое преобразование измерительного сигнала. Однако на практике реализация этой функции сопряжена с трудностями технологического и конструктивного характера. Так, например, амплитудный пространственный фильтр с переменной плотностью на основе фотоматериалов не обеспечивает требуемый динамический диапазон изменения плотности. Линейное преобразование интенсивности света, действующего при экспозиции, в интенсивность света, прошедшего через диапозитив, после его проявления, осуществляется только при весьма специфических условиях. При эксплуатации под воздействием излучения фильтр деформируется, его оптические свойства изменяются, даже если плотность мощности излучения много меньше порога разрушения фотоматериала [7]. Изготовление амплитудно-фазового пространственного фильтра из стекла в виде плоскопараллельной пластины с изменяющейся по координате плотностью в соответствии с оптимальной весовой функцией $g(u)$ представляет значительную технологическую трудность. Изготовление бинарного пространственного фильтра, представляющего собой диафрагму специальной формы, геометрические параметры апертуры которой изменяются в соответствии с оптимальной весовой функцией $g(u)$, также сопряжено с трудностями. В этой связи используются такие упрощенные способы пространственной фильтрации, как экранирование области центра дифракционной картины, где сосредоточена наибольшая энергия сигнала, и сглаживание интенсивности боковых дифракционных максимумов по линейному закону, что только уменьшает динамический диапазон изменения амплитуды сигнала.

Реализовать оптимальную весовую функцию $g(u, t)$ с заданной точностью позволяет применение методов амплитудной или бинарной пространственно-временной фильтрации полезного сигнала из дифракционной картины.

Метод амплитудной пространственно-временной фильтрации сигнала основан на изменении во времени по заданному закону интенсивности регистрируемой дифракционной картины синхронно с ее сканированием и преобразованием во временной сигнал. При сканировании дифракционной картины от центра к периферии ее интенсивность в момент начала сканирования наименьшая, а анализирующая диафрагма совмещена с центром дифракционной картины. При перемещении диафрагмы от центра к периферии интенсивность дифракционной картины синхронно увеличивается в соответствии с весовой функцией $g(u, t)$. При этом на выходе анализирующей диафрагмы возникает изменяющийся во времени поток излучения $\Phi_g(t)$, амплитуда переменной составляющей которого описывается выражением $\Phi_g(t) \cong \Phi_0 \sin^2(\omega_0 t)$. Увеличение интенсивности дифракционной картины во времени синхронно с ее сканированием наиболее целесообразно производить, увеличивая мощность излучения лазера, облучающего контролируемый объект, по заданному закону от порога генерации до максимального значения [8].

Метод бинарной пространственно-временной фильтрации заключается в дискретизации дифракционной картины в виде построчного разложения, выделении из каждой строки разложения требуемого фрагмента видеосигнала, его интегрировании и запоминании результата интегрирования. Начиная с первой строки разложения, проходящей через центр дифракционной картины, длительность интегрируемого фрагмента симметрично увеличивается на величину $\pm \Delta t$ в соответствии с весовой функцией $g(t)$. Огибающая совокупности интегрируемых фрагментов за период построчного разложения дифракционной картины представляет собой сигнал $U_g(t) \cong U_0 \sin^2(\omega_0 t)$.

На рис. 3 показана дифракционная картина и контур области построчного интегрирования, образованный границами интегрируемых фрагментов каждой строки разложения. Сканирование дифракционной картины осуществляется перпендикулярно оси симметрии контура области интегрирования.

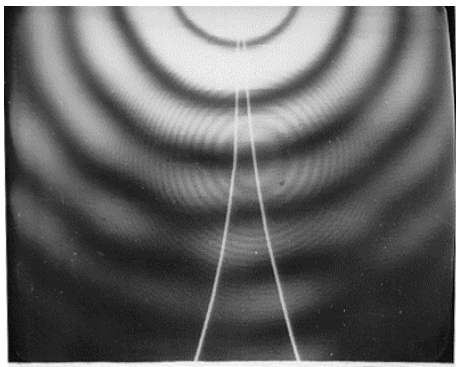


Рис. 3

К основным достоинствам методов амплитудной и бинарной пространственно-временной фильтрации относятся простота реализации и возможность изменения параметров весовой функции в процессе эксперимента, в том числе и автоматически. Пространственно-временные фильтры, построенные на основе рассмотренных методов, реализуются программно или аппаратно с использованием серийно производимых электронных элементов.

Применение оптимальной весовой функции позволяет произвести целенаправленное преобразование измерительного сигнала, получаемого при сканировании дифракционной картины, с усилением полезных свойств сигнала и сокращением избыточности информации. При этом создаются условия, способствующие эффективному подавлению аддитивной высокочастотной помехи традиционными методами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фефилов Г. Д. Применение метода весовой обработки для уменьшения влияния аддитивной помехи на погрешность измерения ширины колец дифракционной картины Эйри // Изв. вузов. Приборостроение, 2006. Т. 49, № 9. С. 63—67.
2. Хургин Я. И., Яковлев В. П. Фinitные функции в физике и технике. М.: Наука, 1971. 408 с.
3. Кузьмин И. В., Кедрус В. А. Основы теории информации и кодирования. Киев: Вища школа, 1977. 280 с.
4. Фельдбаум А. А. Теоретические основы управления. М.: Физматгиз, 1963.
5. Гутников В. С. Фильтрация измерительных сигналов. Л.: Энергоиздат, 1990. 192 с.
6. Сороко Л. М. Основы голографии и когерентной оптики. М.: Наука, 1971. 339 с.
7. Юу Ф.Т.С. Введение в теорию дифракции, обработку информации и голографию / Пер. с англ.; Под ред. В. К. Соколова. М.: Сов. радио, 1979. 304 с.
8. А.с. 1357701 СССР. Дифракционный способ измерения линейного размера изделия и устройство для его осуществления / Г. Д. Фефилов // Б.И. 1987. № 45. С. 5.

Рекомендована кафедрой
лазерной техники
и биомедицинской оптики

Поступила в редакцию
10.04.07 г.

И. С. ФИЛИПОВА, Л. В. АЛЕКСЕЕВА, И. В. ПОВХ, В. И. СТРОГАНОВ

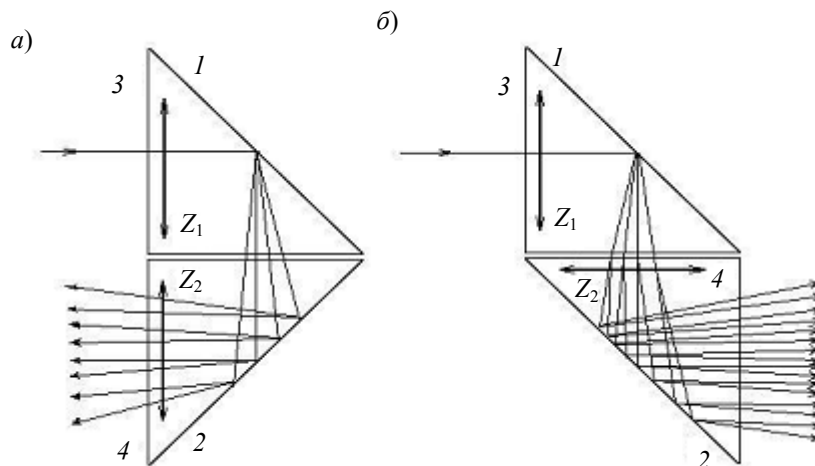
Дальневосточный государственный университет путей сообщения
Хабаровск

ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ИЗ ДВУХ ПРИЗМ С АНИЗОТРОПНЫМИ СВОЙСТВАМИ

Рассматривается система, состоящая из двух призм полного внутреннего отражения, с особым расположением оптических осей, в которой при падении одного луча образуется 8 или 16 лучей.

Активное развитие систем записи, хранения и обработки оптической информации основано на внедрении новых оптических элементов в технические устройства. Одним из таких элементов являются четырехлучерасщепляющие призмы [1, 2], изготовленные из одноосных оптических кристаллов. Как показано в работах [1, 2], при особом расположении оптической оси кристалла относительно трехгранной отражающей призмы при падении одного луча образуется четыре выходящих из призмы луча. Последовательное использование двух таких призм приводит к значительному увеличению числа выходящих из призм лучей — их может быть 8 или 16. В оптической связи это свойство может быть использовано для разделения одного канала связи на несколько (например, 16) или объединения большого числа каналов в один.

Эксперимент проводился на призмах, изготовленных из кристаллов кальцита и теллурида. На рисунке показано расположение призм и ход лучей при проведении эксперимента.



На систему из двух призм с анизотропными свойствами падает луч, поляризованный перпендикулярно к плоскости рисунка. Оптические оси Z_1 , Z_2 призм расположены в плоскостях граней 3 и 4 кристаллов под углом 45° к основанию призм. Если оптические оси двух призм параллельны, образуется 8 лучей, а при их перпендикулярном расположении — 16 лучей (см. рисунок, *a*, *б* соответственно).

При параллельном расположении осей четыре луча, выходящие из первой призмы, поступают во вторую без удвоения, и только на наклонной грани 2 второй призмы происходит удвоение лучей. Выходящие лучи поляризованы попарно взаимно ортогонально, а их векторы напряженности расположены под углом 45° по отношению к основанию призмы.

Когда оптические оси призм перпендикулярны, при переходе луча из одной призмы в другую каждый из распространяющихся четырех лучей разделяется на два, и образующиеся восемь лучей еще раз удваиваются при отражении от наклонной грани 2 второй призмы. На выходе из системы призм образуется 16 лучей. Поляризация выходящих лучей также попарно взаимно ортогональна.

Изменение поляризации падающего излучения приводит к изменению интенсивности и числа лучей на выходе из системы двух призм. При совпадении направления оптической оси первой призмы с направлением вектора напряженности луча, падающего на нее (см. рисунок), интенсивность излучения типа 1 равна нулю, в результате чего остается 8 лучей с поляризацией типа 2. Если же поляризация падающего излучения перпендикулярна оптической оси, то исключаются лучи типа 2, а лучи типа 1 остаются. Таким образом, за счет изменения направления поляризации падающего излучения можно получить на выходе из системы 8 лучей вместо 16 (при перпендикулярном расположении оптических осей призм) или 4 луча вместо 8 (при параллельном расположении оптических осей призм).

Оптические системы, состоящие из трех или более четырехлучерасщепляющих призм, позволяют разделить один луч на заданное количество лучей в зависимости от числа призм и их взаимного расположения. Число лучей на выходе из такой системы легко задать, учитывая, что удвоение происходит в случае изменения положения плоскости главного сечения.

Устройства, включающие несколько четырехлучерасщепляющих призм, целесообразно использовать в нелинейной оптике и квантовой электронике, а также в приборах и линиях оптической связи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеева Л. В., Повх И. В., Строганов В. И. // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25, № 1. С. 46—51.
2. Алексеева Л. В., Кидяров Б. И., Пасько П. Г. и др. // Оптический журнал. 2002. Т. 69, № 6. С. 79—81.

Рекомендована кафедрой
физики

Поступила в редакцию
27.03.06 г.

Л. Н. АНДРЕЕВ, Ю. А. КОМАРОВА

Санкт-Петербургский государственный университет
информационных технологий, механики и оптики

КОРРЕКЦИЯ СФЕРИЧЕСКОЙ АБЕРРАЦИИ В ДВУХЗЕРКАЛЬНОЙ КОНЦЕНТРИЧЕСКОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

Излагается методика исправления сферической аберрации 3-го и высшего порядков в двухзеркальной концентрической системе в случае расположения предмета на конечном расстоянии. Приводится числовой пример расчета объектива с дифракционным качеством изображения.

Как известно [1—6], особенностью двухзеркальной концентрической системы при расположении входного зрачка в центре кривизны является отсутствие аберраций: комы, астигматизма и дисторсии ($S_{II} = S_{III} = S_V = 0$, $S_{IV} = 1/f'$). Сферическая аберрация в общем случае не исправлена. В работах [5, 6] найдено числовое значение коэффициента $k = r_1 / r_2 = 0,382$ для частного случая расположения предмета на бесконечности, при котором сферическая аберрация 3-го порядка равна нулю ($S_I = 0$).

В настоящей статье исследуется сферическая аберрация 3-го порядка (S_I) в общем случае расположения предмета относительно зеркального объектива и приводится методика устранения сферической аберрации высшего порядка. Конструктивные параметры элементов двухзеркальной концентрической системы, представленной на рис. 1, могут быть вычислены по следующим формулам:

$$\left. \begin{aligned} r_1 &= 2(1-k)f'; \quad r_2 = \frac{2(1-k)}{k} f'; \\ d &= -\frac{2(1-k)^2}{k} f'; \\ s_1 &= \left[\frac{1-\beta}{\beta} + 2(1-k) \right] f'; \quad s'_2 = \left[1-\beta + \frac{2(1-k)}{k} \right] f'; \\ t_2 &= \left[\frac{1-\beta}{\beta} + \frac{2(1-k)}{k} \right] f'; \quad t'_1 = (3-\beta-2k)f'; \\ \theta_\emptyset &= \frac{1-\beta(2k-1)}{3-2k}; \\ L &= \frac{(\beta-1)^2}{\beta} f', \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где r_1 и r_2 — радиусы первого и второго зеркала соответственно; d — расстояние между зеркалами; s_1 и s'_2 — расстояние от вершины O_1 первого зеркала до плоскости предмета (A) и расстояние от вершины O_2 второго зеркала до плоскости изображения (A') соответственно; t_2 и t'_1 — расстояние от вершины второго зеркала до плоскости предмета и расстояние от вершины первого зеркала до плоскости изображения соответственно; β — линейное увеличение системы, f' — фокусное расстояние; θ_\emptyset — центральное экранирование по диаметру; L — расстояние от предмета до изображения.

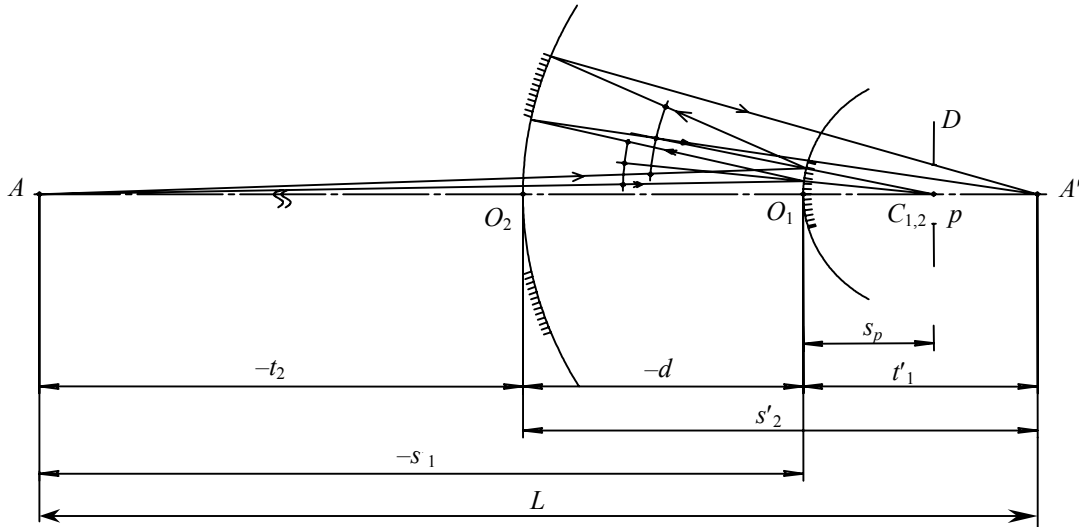


Рис. 1

Рассмотрим первую сумму Зейделя, определяющую сферическую aberrацию 3-го порядка при следующих условиях нормирования: $\alpha_1 = \beta$, $\alpha' = 1$, $n_1 = n_3 = -n_2 = 1$, $h_1 = s_1\beta$:

$$S_1 = h_1 P_1 + h_2 P_2, \quad (2)$$

где P_1 и P_2 — монохроматические параметры [1], h_1 и h_2 — высоты пересечения 1-го параксиального луча с зеркалами.

Раскрывая значения величин P_1 и P_2 , учитывая, что $\alpha_2 = \beta + \frac{s\beta}{(1-k)f'}$, и подставляя их в выражение (2), получаем

$$S_1 = -\frac{1}{4(1-k)^3} \left\{ s_1 \beta^3 [2\beta(1-k) + s_1\beta] + \left[s_1\beta + \frac{2(1-k)^2\beta}{k} f' + \frac{2(1-k)s_1\beta}{k} f' \right] \times \right. \\ \left. \times [1 - k - \beta(1-k) - s_1\beta]^2 [1 - k + \beta(1-k) + s_1\beta] \right\}. \quad (3)$$

В результате анализа уравнения (3) и проведения числовых расчетов с использованием компьютерной программы „Опал“ найдена приближенная зависимость $k=f(\beta)$ при $S_1=0$:

$$\left. \begin{aligned} k &= 0,382 + 0,660\beta \text{ при } \beta = -(0 \dots 0,2^{\times}); \\ k &= 2,618 - \frac{5}{\beta} \text{ при } \beta = -(10^{\times} \dots 100). \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Результаты расчетов графически представлены на рис. 2.

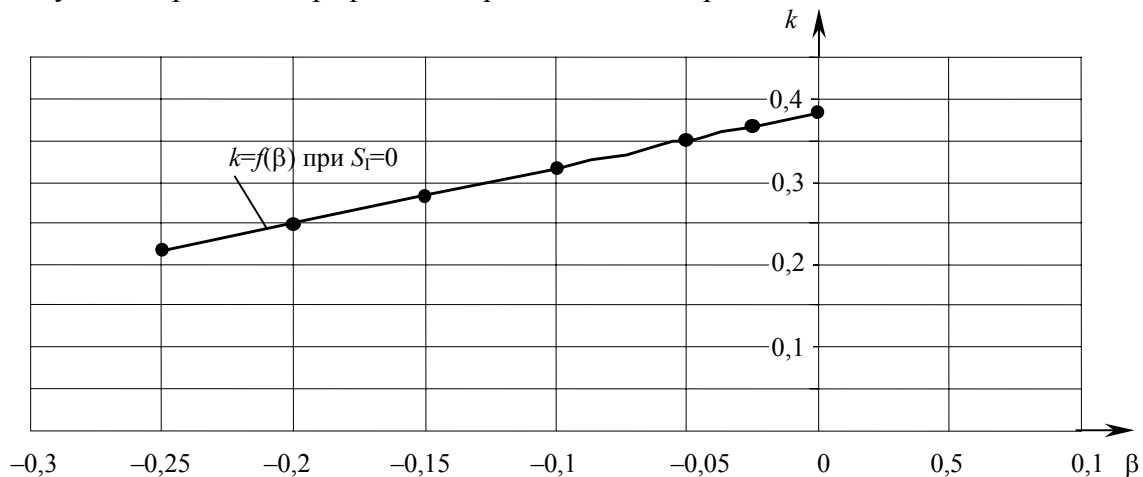


Рис. 2

Таким образом, при расчете концентрического зеркального объектива при заданном значении β по формулам (4) и в соответствии с рис. 2 можно определить коэффициент $k=r_1/r_2$, при котором сферическая аберрация 3-го порядка отсутствует ($S_I=0$). При необходимости коррекции сферической аберрации высшего порядка следует незначительно изменить коэффициент $k=r_1/r_2$ при прежних значениях $S_{II}=S_{III}=S_V=0$.

В качестве примера приведем результаты расчета двухзеркального концентрического объектива со следующими характеристиками: $\beta=-0,1^\times$; $f=25$ мм; $A=0,03$; $k=r_1/r_2=0,3175$; $2y=30$ мм. Конструктивные параметры элементов объектива приведены в табл. 1, аберрации точки на оси — в табл. 2, аберрации точек вне оси — в табл. 3.

Таблица 1

Радиус	Осевое расстояние	Оптическая среда	n_e
—	—	Воздух	1,0
$r_1=34,125$	$d_1=-73,355$	Воздух	-1,0
$r_2=107,48$	—	Воздух	1,0

Таблица 2

$\sin \sigma_A$	$\text{tg } \sigma'$	$\Delta s'$, мм	$\Delta y'$, мм	η , %	N/λ
0,03	0,3	0,00	0,00	0,00	0,00
$0,03 \sqrt{3/4}$	0,26	0,00	0,00	0,00	0,00
$0,03 \sqrt{1/2}$	0,21	0,00	0,00	0,00	0,00
$0,03 \sqrt{1/4}$	0,15	0,00	0,00	0,00	0,00
0	0	0	0	0	0

Таблица 3

y , мм	y' , мм	s_p , мм	$s'_{p'}$, мм	z'_c , мм	z'_m , мм	$z'_c - z'_m$, мм	$\Delta y'$, мм	$\Delta y'/y'$, %
-15,00	1,50	34,125	107,48	-0,05	-0,05	0,00	0,00	0,00
-10,60	1,06	34,125	107,48	-0,02	-0,02	0,00	0,00	0,00
0	0	34,125	107,48	0	0	0	0	0

В табл. 2, 3 использованы следующие обозначения: $\sin \sigma_A$ — числовая апертура в пространстве предметов; σ' — угол апертурного луча с оптической осью; $\Delta s'$ и $\Delta y'$ — продольная и поперечная сферическая аберрация соответственно; η — отступление от изоплاناзии; N/λ — волновая аберрация в долях волны $\lambda=0,546$ мкм; y — величина предмета; y' — величина изображения; s_p и $s'_{p'}$ — положение входного и выходного зрачка соответственно; z'_c и z'_m — положение фокусов бесконечно тонких пучков лучей в сагиттальной и меридиональной плоскостях соответственно; $\Delta y'/y'$ — дисторсия.

Как следует из анализа табл. 2 и 3, в объективе достигнута высокая коррекция сферической аберрации, комы, астигматизма и дисторсии. Необходимо отметить, что кривизна поверхности может быть устранена путем введения в оптическую схему зеркального объектива апланатического мениска с увеличением 1^\times [5, 6].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Слюсарев Г. Г. Методы расчета оптических систем. Л.: Машиностроение, 1989. 379 с.
2. Панов В. А., Андреев Л. Н. Оптика микроскопов. Л.: Машиностроение, 1976. 432 с.
3. Андреев Л. Н. Прикладная теория аберраций: Учеб. пособие. СПб.: ИТМО, 2002. 98 с.
4. Зверев В. А. Основы геометрической оптики. СПб.: ИТМО, 2002. 218 с.

5. Андреев Л. Н., Милорадов А. В. Двухзеркальные светосильные реверсивные телеобъективы // Изв. вузов. Приборостроение. 2006. Т. 49, № 5. С. 56—60.
6. Андреев Л. Н., Голодкова И. О. Зеркально-линзовый светосильный объектив с плоским полем // Там же. 2007. Т. 50, № 3. С. 59—61.

Рекомендована кафедрой
прикладной и компьютерной оптики

Поступила в редакцию
06.06.07 г.

РЕФЕРАТЫ

УДК 681.326.74.06

ИНФОРМАЦИОННО-ПОИСКОВАЯ СИСТЕМА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ОБЪЕКТА НА ОСНОВЕ ПРИНЦИПА СОГЛАСОВАННОГО ОПТИМУМА / А. К. ДМИТРИЕВ, А. Н. КРАВЦОВ // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 1. С. 5—13.

Предлагается алгоритм синтеза оптимальной программы идентификации состояния объекта, полученного в виде информационного сообщения. Алгоритм реализуется в рамках метода динамического программирования. Оптимизируемой функцией является так называемый согласованный показатель эффективности, учитывающий информационную полезность и стоимость проверок выбираемых признаков. Приводится числовой пример.

Ил. 3, табл. 3, библиогр. 4.

УДК 621.391.828

МЕТОД ОБРАБОТКИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МАЛОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА С УЧЕТОМ АПРИОРНЫХ ОГРАНИЧЕНИЙ / А. П. АЛЕШКИН, А. В. ГАВРИЛЕНКО, К. В. ИВАНОВ, В. П. КРАСНЫЙ, В. А. НОВИКОВ, А. И. ХОРУЖИЙ // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 1. С. 13—17.

Рассматриваются вопросы использования построенного закона распределения случайной величины для обработки измеряемых радиолокатором характеристик малого космического аппарата с учетом априори известных ограничений на дисперсию ошибок траекторных измерений. Проводится анализ эффективности данного метода, формулируются рекомендации по его использованию для калибровки измерительных радиолокационных систем.

Ил. 3, библиогр. 3.

УДК 004.78:681.31

МЕТОД ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ КОРРЕКЦИИ УСТРОЙСТВ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДАННЫХ С ВРЕМЕННОЙ ИЗБЫТОЧНОСТЬЮ / А. И. ДОЛГОВ, Е. В. ВАНЮЛИН // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 1. С. 17—20.

Рассматривается метод функциональной коррекции устройств преобразования данных с временной избыточностью, основанный на использовании динамического резерва, возникающего в процессе непосредственного функционирования объекта. Существо предлагаемого метода заключается в повышении функциональной надежности устройства преобразования информации на основе целенаправленного изменения входных данных и повторного воспроизведения функции объекта. Формальное описание метода приводится применительно к электронным системам обработки данных.

Ил. 2, библиогр. 7.

УДК 519.8+519.95+629.7;681.3

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОЦЕНИВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОМПЛЕКСА МЕРОПРИЯТИЙ НА ОСНОВЕ АЛГЕБРЫ НЕЧЕТКИХ ЧИСЕЛ / З. З. БАГАУТДИНОВ, А. С. ГЕЙДА, И. В. ЛЫСЕНКО // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 1. С. 21—24.

Рассматриваются проблемы, возникающие при оценивании эффективности комплекса мероприятий (работ, технологических операций, целевых программ) в условиях неопределенности. Предложен метод оценивания на основе математического моделирования комплекса мероприятий в рамках разработанной алгебры нечетких чисел.

Ил. 3, табл. 1, библиогр. 6.

УДК 62.50

СИНТЕЗ МНОГОМЕРНЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНО ВЫРОЖДЕННЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ / А. Л. БОЧКОВ, Н. А. ДУДАРЕНКО, А. В. УШАКОВ // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 1. С. 25—29.

Рассматриваются проблемы, связанные с синтезом многомерных функционально вырожденных систем, которые возникают во многоагрегатных технических средах типа „многомерный вход — многомерный выход“ (МВМВ). Формируются алгебраические условия реализуемости синхронного режима функционирования системы МВМВ, приводится алгоритм синтеза.

Библиогр. 8.

УДК 62.50

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЕРТИКАЛЬНОЙ КАЧКИ КОРАБЛЯ / В. В. ГРИГОРЬЕВ, Ю. В. МЕДЫНСКИЙ, М. М. МОТЫЛЬКОВА, О. К. МАНСУРОВА // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 1. С. 29—34.

Описывается алгоритм прогнозирования вертикальной качки на море, который может быть использован для повышения точности работы бортовых систем автоматического управления посадкой самолетов палубной авиации и разработки новых систем управления беспилотными летательными аппаратами. Приводится математическая модель процесса качки. Рассматривается использование фильтра Калмана для построения устройства оценки. На основе статистического анализа системы прогнозирования делается вывод о величине интервала прогнозирования, в котором обеспечивается приемлемая точность прогноза.

Ил. 4, библиогр. 5.

УДК 004.05

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ / В. В. БУРАКОВ // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 1. С. 35—41.

Описывается формальная методика оценки качества программных средств (ПС), основанная на использовании модели качества ПС, с помощью которой происходит концептуальное моделирование понятия качества, и модели метрик, обеспечивающей количественную оценку качества ПС. Применение описанной формализованной количественной методики оценки качества ПС позволит создать серьезную основу для процесса управления качеством, принятия управленческих и инженерных решений на протяжении всего жизненного цикла ПС.

Ил. 4, табл. 3, библиогр. 5.

УДК 621.034.4-8:362.41

СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ С НЕВИЗУАЛЬНЫМ ПРЕДСТАВЛЕНИЕМ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ИНФОРМАЦИИ / С. О. ЕРШОВ, П. МАЙЕР // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 1. С. 42—47.

Рассмотрены системы технического зрения, позволяющие человеку воспринимать пространственную информацию посредством слуха или осязания и применяемые в технических средствах ориентирования для слепых и работников аварийно-спасательных служб. Приведены краткие сведения по истории и текущему состоянию вопроса. Предложен вариант классификации рассматриваемых систем. Более подробно рассмотрен принцип действия наиболее информативных средств ориентирования, их перспективы и пути усовершенствования. Обсуждены проблемы, связанные с внедрением приборов данного класса в серийное производство.

Ил. 3, библиогр. 3.

УДК 621.17.34

РАСЧЕТ АКСИАЛЬНОГО ГРАДИЕНТНОГО МОДУЛЯ МАГНИТОРЕЗОНАНСНОГО ТОМОГРАФА / П. А. ГАЛАЙДИН // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 1. С. 47—54.

Рассмотрен метод расчета аксиального градиентного модуля магниторезонансного томографа, состоящего из трех градиентных систем, генерирующих линейно изменяющиеся по трем осям декартовой системы координат магнитные поля. Предварительная конфигурация обмоток определяется с помощью разложения в ряд функции индукции магнитного поля градиентных систем, затем, с помощью метода оптимизации, уточняется положение обмоток. Приведены результаты расчета и схемы градиентных систем.

Ил. 7, табл. 3, библиогр. 6.

УДК 621.382

МОДЕЛЬ БАРЬЕРНОГО МЕХАНИЗМА ВОЗНИКНОВЕНИЯ $1/f$ -ШУМА В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ УСТРОЙСТВАХ / В. Ю. ХОЛКИН // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 1. С. 54—58.

Рассматривается модель возникновения $1/f$ -шума, основанная на преодолении носителями потенциальных барьеров, вызванных как неоднородностями в структуре материала, так и ловушечно-рекомбинационными явлениями. Решение задачи распределения плотности вероятности преодоления единичным носителем энергии потенциального барьера объясняет наличие пределов значения степени ν в эмпирической формуле $1/f^\nu$.

Ил. 2, библиогр. 13.

УДК 621.396.965.8

АВТОМАТИЧЕСКОЕ ВОССТАНОВЛЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ, ИСКАЖЕННЫХ ПРЯМОЛИНЕЙНЫМ РАВНОМЕРНЫМ СМАЗОМ / А. С. МАЧИХИН // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 1. С. 59—64.

Рассмотрена проблема восстановления смазанных изображений. Приведены аналитические выражения, описывающие процесс формирования искаженного смазом изображения. На основе их анализа предложен метод автоматической оценки параметров прямолинейного равномерного смаза. Суть метода составляет однозначное определение функции данного вида смаза по положению нулей пространственно-частотного спектра искаженного изображения. Параметры смаза вычисляются при отсутствии априорной информации об условиях регистрации изображения и параметрах формирующей его оптико-электронной системы. Описан один из возможных вариантов алгоритмической реализации метода. Приведены результаты апробации метода при восстановлении реальных изображений.

Ил. 3, библиогр. 5.

УДК 531.717; 681.518.3.08

СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОЙ ВЕСОВОЙ ФУНКЦИИ И МЕТОДЫ ЕЕ РЕАЛИЗАЦИИ В ЛАЗЕРНОЙ ДИФРАКТОМЕТРИИ МИКРООБЪЕКТОВ / Г. Д. ФЕФИЛОВ // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 1. С. 64—68.

Рассматривается методика синтеза оптимальной весовой функции, в основу которого положены преобразования спектра сигнала. Показано, что прямое заимствование традиционных методов оптической фильтрации для реализации оптимальной весовой функции на практике сопряжено с трудностями технологического и конструктивного характера. Рассмотрены оригинальные методы амплитудной и бинарной пространственно-временной фильтрации, позволяющие реализовать оптимальную весовую функцию с заданной точностью. Пространственно-временные фильтры, построенные на основе предложенных методов, реализуются программно или аппаратно с использованием серийных компонентов.

Ил. 3, библиогр. 8.

УДК 535:548.0

ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ИЗ ДВУХ ПРИЗМ С АНИЗОТРОПНЫМИ СВОЙСТВАМИ / И. С. ФИЛИППОВА, Л. В. АЛЕКСЕЕВА, И. В. ПОВХ, В. И. СТРОГАНОВ // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 1. С. 69—70.

Рассматриваются явления, связанные с распространением оптических лучей в системе, состоящей из двух отражающих призм, изготовленных из одноосного кристалла и ориентированных друг относительно друга определенным образом. При параллельном расположении оптических осей двух призм, составляющих систему, при падении одного луча на ее выходе образуется 8 лучей, а при перпендикулярном расположении — 16 лучей. Меняя поляризацию падающего излучения, можно изменять интенсивность и число образующихся лучей.

Ил. 1, библиогр. 2.

УДК 535.317

КОРРЕКЦИЯ СФЕРИЧЕСКОЙ АБЕРРАЦИИ В ДВУХЗЕРКАЛЬНОЙ КОНЦЕНТРИЧЕСКОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ / Л. Н. АНДРЕЕВ, Ю. А. КОМАРОВА // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 1. С. 71—74.

Приводится методика исправления сферической aberrации 3-го и высшего порядков в двухзеркальной концентрической системе. Получено и исследовано выражение для первой суммы Зейделя S_1 в общем виде. Найдена зависимость коэффициента $k=r_1/r_2=f(\beta^x)$, при котором $S_1=0$. Приводится числовой пример.

Ил. 2, табл. 3, библиогр. 6.