

ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

Учредитель
ОАО «Издательство «Политехника»»

Главный редактор
М. Б. Сергеев,
доктор технических наук, профессор

Зам. главного редактора
Г. Ф. Мощенко

Редакционный совет:
Председатель А. А. Оводенко,
доктор технических наук, профессор
В. Н. Васильев,
доктор технических наук, профессор
В. Н. Козлов,
доктор технических наук, профессор
Ю. Ф. Подоплекин,
доктор технических наук, профессор
Д. В. Пузанков,
доктор технических наук, профессор
В. В. Симаков,
доктор технических наук, профессор
А. Л. Фрадков,
доктор технических наук, профессор
Л. И. Чубраева,
доктор технических наук, профессор, чл.-корр. РАН
Р. М. Юсупов,
доктор технических наук, профессор, чл.-корр. РАН

Редакционная коллегия:
В. Г. Анисимов,
доктор технических наук, профессор
Е. А. Крук,
доктор технических наук, профессор
В. Ф. Мелехин,
доктор технических наук, профессор
А. В. Смирнов,
доктор технических наук, профессор
В. И. Хищенко,
доктор технических наук, профессор
А. А. Шальто,
доктор технических наук, профессор
А. П. Шепета,
доктор технических наук, профессор
З. М. Юлдашев,
доктор технических наук, профессор

Редактор: А. Г. Ларионова
Корректор: Т. В. Звертановская
Дизайн: А. Н. Колешко, М. Л. Черненко
Компьютерная верстка: С. В. Барашкова
Ответственный секретарь: О. В. Муравцова

Адрес редакции: 190000, Санкт-Петербург,
Б. Морская ул., д. 67, ГУАП, РИЦ
Тел.: (812) 494-70-44
Факс: (812) 494-70-18
E-mail: 80x@mail.ru
Сайт: www.i-us.ru

Журнал зарегистрирован в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций. Свидетельство о регистрации ПИ № 77-12412 от 19 апреля 2002 г.

Журнал входит в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени доктора и кандидата наук».

Журнал распространяется по подписке. Подписку можно оформить через редакцию, а также в любом отделении связи по каталогам: «Роспечать»: № 48060, № 15385; «Пресса России»: № 42476.

© Коллектив авторов, 2010

ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И УПРАВЛЕНИЕ

Видин Б. В., Жаринов И. О., Жаринов О. О. Декомпозиционные методы в задачах распределения вычислительных ресурсов многомашинных комплексов бортовой авионики 2

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ

Анитропов Р. В., Бронштейн И. Г., Васильев В. Н., Зверев В. А., Лившиц И. Л., Сергеев М. Б., Унчун Чо. Анализ параметрической модели обобщенного триплета и его применение в оптико-информационных системах 6

Мухина О. В., Никитин А. В. Метод адаптивного представления интерактивных электронных сред с погружением 14

Аль-Шайх Хасан, Лячек Ю. Т. Параметризация конструкторских чертежей 18

Ндикумагенге Ж. Вычислительные модели параллельных транзакционных серверов 25

ПРОГРАММНЫЕ И АППАРАТНЫЕ СРЕДСТВА

Мараховский В. Б., Мелехин В. Ф. Проектирование средств синхронизации блоков глобально асинхронных систем с произвольной локальной синхронизацией 29

Чернухин Ю. В., Унакафов А. М. Классификация и анализ методов программно-аппаратной поддержки процедур тренинга эмоционального самоконтроля человека 39

КОДИРОВАНИЕ И ПЕРЕДАЧА ИНФОРМАЦИИ

Санкин П. С., Литвинов М. Ю. Анализ вторичной информации в JPEG 45

ИНФОРМАЦИОННЫЕ КАНАЛЫ И СРЕДЫ

Савищенко Н. В. Помехоустойчивость когерентного приема многопозиционных сигналов КАМ и ФМ при неидеальной синхронизации 52

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

Антал А. Модель электронного муарового измерительного прибора 63

Дорошенко М. С. Анализ влияния динамических характеристик системы управления активной компенсацией отклонения луча в автоколлиматоре на погрешности измерения 69

УПРАВЛЕНИЕ В МЕДИЦИНЕ И БИОЛОГИИ

Смирнова Л. М. Модель поддержки принятия решения при оценке функциональной эффективности ортезирования нижних конечностей 74

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

81

АННОТАЦИИ

85

УДК 629.7.05

ДЕКОМПОЗИЦИОННЫЕ МЕТОДЫ В ЗАДАЧАХ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ РЕСУРСОВ МНОГОМАШИННЫХ КОМПЛЕКСОВ БОРТОВОЙ АВИОНИКИ

Б. В. Видин,

канд. техн. наук, зам. главного конструктора

И. О. Жаринов,

канд. техн. наук, главный специалист

ФГУП «СПб ОКБ “Электроавтоматика” имени П. А. Ефимова»

О. О. Жаринов,

канд. техн. наук, доцент

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Рассматривается подход к разработке эффективных методов организации вычислительных процессов на борту летательных аппаратов. Предлагается методика декомпозиции вычислительной системы на функциональные элементы.

Ключевые слова — многопроцессорные вычислительные системы, декомпозиция вычислительных задач.

Введение

В настоящее время оборудование на борту летательных аппаратов непрерывно усложняется, в связи с чем встает вопрос оптимального построения вычислительных средств. Традиционно в бортовых комплексах гражданской и военной авиации вычислительные функции выполнялись специализированной бортовой цифровой вычислительной системой (БЦВС), как правило, состоящей из нескольких резервированных вычислителей, осуществляющих параллельные вычисления и выполненных на базе однокристалльной микроЭВМ (так называемое ядро вычислительной системы).

Современная практика построения аппаратуры показывает, что в большинстве случаев отдельные компоненты бортовых систем — электронные блоки — уже включают в свой состав микропроцессорные платформы, использующиеся, например, в интеллектуальных периферийных устройствах ввода/вывода, графоускорителях (графических контроллерах систем индикации), в источниках бортового электропитания и т. д.

Как следствие, под БЦВС сегодня следует понимать уже не отдельную, пусть даже и резервированную, бортовую цифровую вычислительную машину (БЦВМ), а более сложный многомашиный комплекс (крейт) средств интегрированной

модульной авионики (ИМА) с периферийными устройствами и средствами индивидуального математического и программного обеспечения.

Однако достаточно эффективно эти крейты функционируют только при реализации относительно малосвязных задач [1]. При решении многосвязных задач и задач, схожих с ними по организации вычислительного процесса, в которых задействуется большое число вычислителей с интенсивным межпроцессорным информационным обменом, использование многомашинных вычислительных комплексов нецелесообразно. Их реальная производительность, как показывают исследования специалистов ОАО «НИЦЭВТ» [2], составляет лишь 5–10 % от потенциальных возможностей.

В связи с этим оказывается актуальной задача разработки математических методов декомпозиции функциональных задач вычислительных комплексов на частные независимые подзадачи, каждая из которых может быть реализована на своем вычислителе в общем крейте БЦВС.

Предлагаемый подход к декомпозиции функциональных задач БЦВС

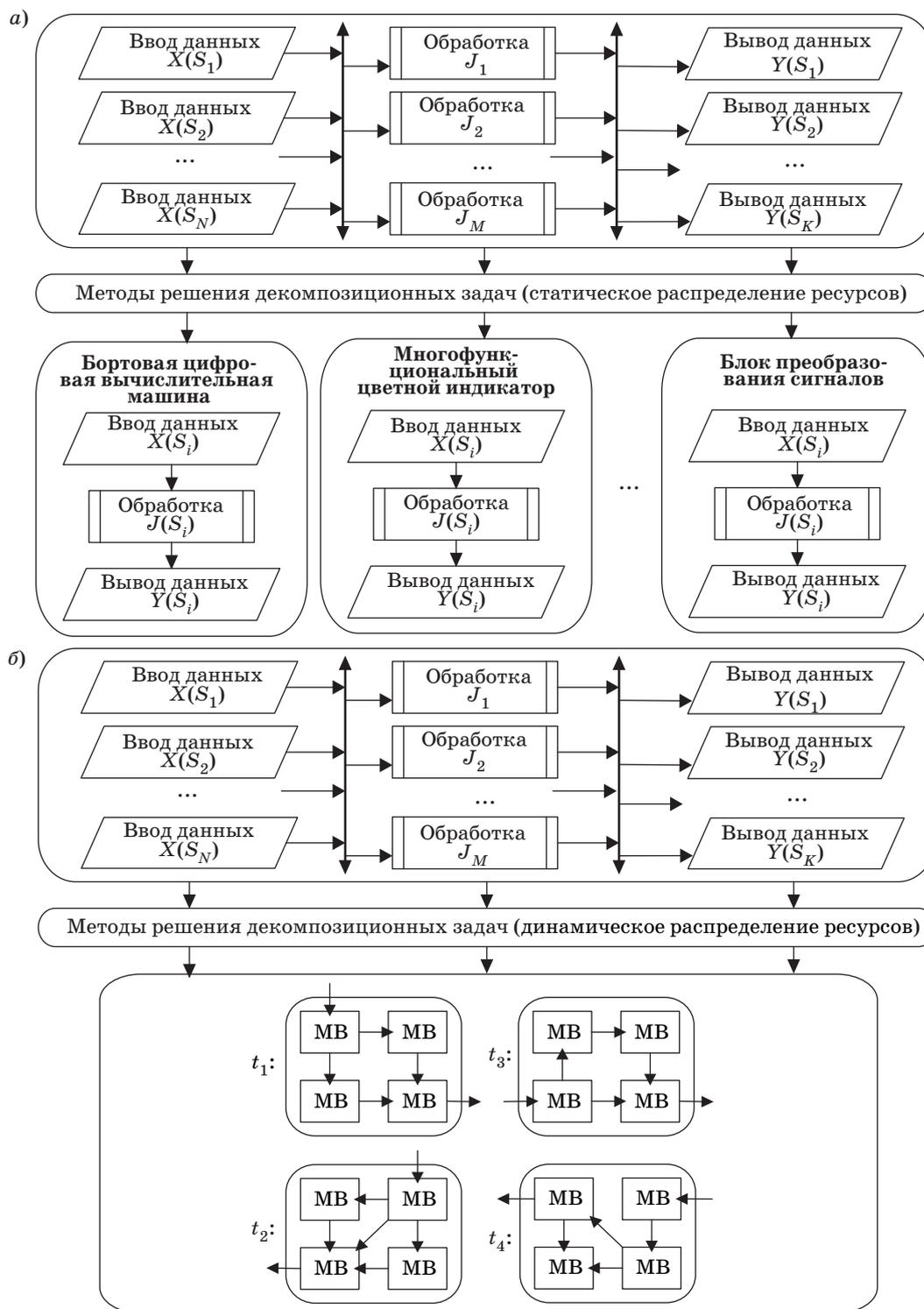
Не снижая общности рассуждений, будем полагать, что существует два независимых подхода

к рассмотрению БЦВС как сложной технической системы в виде [3]:

— модели многомашинной вычислительной системы со связностью на уровне функциональных задач всего комплекса бортового радиоэлек-

тронного оборудования (БРЭО) (межмашинные логические и электрические связи медленного цикла, рис. 1, а);

— модели многопроцессорной вычислительной системы со связностью на уровне конкретной



■ Рис. 1. Структурная схема статической (а) и динамической (б) декомпозиции функциональных задач в вычислительной системе БРЭО

задачи отдельных вычислителей (межпроцессорные логические и электрические связи быстрого цикла, рис. 1, б).

Сущность метода декомпозиции функциональных задач заключается в следующем. Пусть имеется n информационно связанных задач, которые необходимо решать с помощью крейта ИМА, и соответствующие этим задачам алгоритмы. Каждый алгоритм может быть представлен как некоторая последовательность функциональных операторов.

Граф, соответствующий результирующему вычислительному алгоритму, образуется следующим образом. Каждому, например i -му, функциональному оператору Φ_i алгоритма ставится в соответствие вершина графа v_i , возле которой записывается ее вес — время выполнения данного функционального оператора в относительных единицах. Вершины v_i и v_j соединяются линией со стрелкой (дугой графа), направленной в v_i только в том случае, если результат, полученный после выполнения v_j , является одним из аргументов для v_i . Всякая дуга выражает либо вычислительную зависимость между соответствующими функциональными операторами, либо требования порядка выполнения соединяемых вершин, либо то и другое.

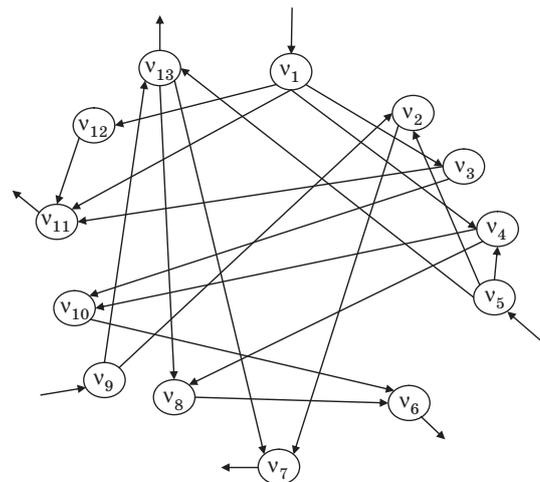
Совокупность графов n задач составляет метаграф G_{BC} процесса решения n задач всей вычислительной системы. Так как рассматриваемые задачи информационно связаны, то и граф G_{BC} является связным.

Проектирование модели крейта ИМА состоит в выборе числа модулей-вычислителей (МВ) и в определении электрических (логических) связей между ними в соответствии с графом G_{BC} , ограничениями (время, надежность и т. д.) и некоторым функционалом оптимальности. Назовем вершины графа G_{BC} , в которые входят дуги исходных данных, начальными, а вершины, из которых выходят дуги результата решения задач или фрагментов вычисления, — конечными (так, на рис. 2 вершины v_1, v_5, v_9 являются начальными, а вершины v_6, v_7, v_{11} — конечными).

Назовем также подграф G_{BCi} графа G_{BC} независимым, если ни в одну его вершину не входит дуга другого подграфа. Нетрудно видеть, что для организации вычислительного процесса необходимо разложить граф G_{BC} на независимые подграфы G_{BCi} .

Действительно, для независимого подграфа не нужны промежуточные результаты операторов, не входящих в этот подграф, и, следовательно, каждый из них можно реализовать на отдельном вычислителе, обмениваясь информацией по «медленному» интерфейсу. Очевидно, число МВ будет зависеть от числа независимых подграфов.

Поскольку все вычислители будут работать параллельно, время t_p выполнения всех n задач при такой структуре будет минимальным, т. е.



■ Рис. 2. Операционная модель G_{BC} вычислительной системы БРЭО в виде многосвязного графа операций обмена и обработки информации

дальнейшее увеличение числа процессоров не уменьшит t_p .

Рассмотрим следующие основные положения, на которых строится алгоритм декомпозиции графа на независимые подграфы.

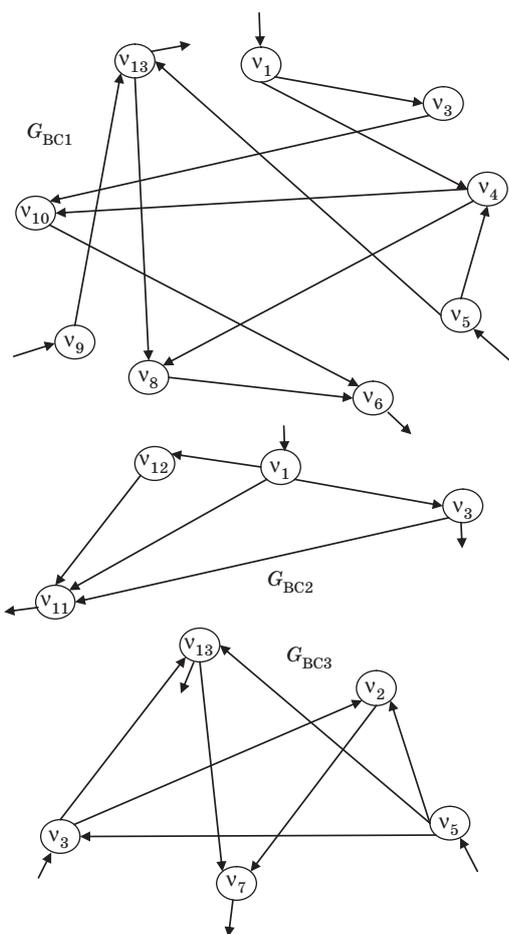
Если существует множество вершин $v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{ik}$, из которых дуги выходят и входят в вершину v_i , то это множество принадлежит независимым подграфам, в которые входит вершина v_i . В то же время вершина v_i будет входить в независимые подграфы, строящиеся на базе вершин, в которые входят дуги, выходящие из вершины v_i .

Определим матрицу размерностью $m \times m$ (m — число вершин графа), у которой элемент на пересечении i -й строки и j -го столбца равен 1, если имеется дуга, направленная от i -й вершины к j -й вершине. Если дуга имеет противоположное направление, соответствующий элемент равен -1 . При отсутствии такой дуги рассматриваемый элемент определяется как 0.

На первом этапе алгоритма рассматриваются строки матрицы графа G_{BC} с целью выявить строку, имеющую только отрицательные единицы (тем самым определяется конечная вершина). Номер вершины данной строки будет составлять первый элемент образуемого массива E .

На втором этапе по полученной строке определяются столбцы, которые имеют на пересечении с ней отрицательные элементы. Тем самым выявляются вершины, входящие в независимый подграф найденной конечной вершины. Номера этих вершин вводятся в массив E .

На третьем этапе просматриваются элементы найденных выше столбцов, и отрицательные из них обнуляются. Этим исключается возможность последующего просмотра уже найденных вершин при наличии в графе контуров. Далее повторяются



■ Рис. 3. Независимые подграфы G_{BC1} , G_{BC2} , G_{BC3} многосвязного графа G_{BC}

манипуляции второго этапа со строками, соответствующими указанным выше столбцам, и т. д. После того как исчерпаны все строки, имеющие отрицательные элементы, массив E , образованный в результате реализации алгоритма, выводится на печать. Этот массив дает перечисление всех вершин, входящих в первый независимый подграф.

На четвертом этапе происходит подготовка к реализации следующего цикла алгоритма. С этой целью стертые ранее отрицательные элементы восстанавливаются, а полученные на первом этапе строки и соответствующие им столбцы обнуляются. Далее процедура повторяется (начиная с первого этапа).

Алгоритм прекратит реализацию после того, как все строки, имеющие только отрицательные элементы, будут исчерпаны. Если каждый независимый i -й подграф графа G_{BC} реализуется на отдельном МВ за время t_{pi} , то $t_p = \max\{t_{p1}, t_{p2}, \dots, t_{pN}\}$.

Если имеются ограничения вида $\sum_{j=1}^l t_{pij} \leq t_p$, тогда l подграфов, которым принадлежит суммарное время решения, могут быть реализованы

последовательно на одном бортовом вычислителе, при этом общее время t_p решения n задач не увеличится. Конструктивная реализация многомашиной вычислительной системы дает оптимум по критерию минимума числа вычислителей МВ, используемых в составе крейта БЦВС ИМА.

Применение алгоритма функционального разделения графа (см. рис. 2) позволяет получить три его независимых подграфа (рис. 3), каждый из которых соответствует своему алгоритму, исполняемому на отдельном вычислителе.

Заключение

Концепция ИМА реализуется в аппаратуре БРЭО летательного аппарата через набор доступных к использованию ресурсов (вычислители, память, каналы ввода/вывода), конструктивно объединенных на борту летательного аппарата в стандартный крейт. Ресурсы ИМА представляют собой унифицированные конструктивно функциональные модули открытой архитектуры, имеющие собственные вычислительные средства в унифицированном исполнении.

Расчеты и результаты опытных работ в ФГУП «СПб ОКБ «Электроавтоматика» имени П. А. Ефимова» с использованием рассмотренного метода декомпозиции показывают, что внедрение ИМА-структур на базе унифицированных модулей ИМА с крейтово-модульным конструктивом стойки для решения бортовых задач приводит к экономии материальных средств при реализации аппаратного обеспечения от 19 до 48 % (в зависимости от сложности комплекса и реализованного в нем уровня резервирования) по критерию минимума вычислителей, используемых в аппаратуре БРЭО, с сохранением эквивалентной производительности БЦВС.

Литература

1. Дмитриенко Н. Н., Каляев И. А., Левин И. И., Селярников Е. А. Семейство многопроцессорных вычислительных систем с динамически перестраиваемой архитектурой // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2009. № 6. С. 35–47.
2. Митрофанов В., Слущин А., Ларионов К., Эйсмонт Л. Направления развития отечественных высокопроизводительных систем // Открытые системы. 2003. № 5. <http://www.osp.ru/os/2003/05/183021.pdf> (дата обращения: 18.09.2009).
3. Копорский Н. С., Видин Б. В., Жаринов И. О. Организация вычислительного процесса в многомашином бортовом вычислительном комплексе // Изв. вузов. Приборостроение. 2006. Т. 49. № 6. С. 41–50.

УДК 681.45

АНАЛИЗ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОБОБЩЕННОГО ТРИПЛЕТА И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ В ОПТИКО-ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

Р. В. Анитропов,

инженер

ООО «Анкил»

И. Г. Бронштейн,

директор Центра оптико-информационных технологий

В. Н. Васильев,

доктор техн. наук, профессор

В. А. Зверев,

доктор техн. наук, профессор

И. Л. Лившиц,

канд. техн. наук, старший научный сотрудник

Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий,

механики и оптики

М. Б. Сергеев,

доктор техн. наук, профессор

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Унчун Чо,

доктор техн. наук, профессор

Корейский политехнический университет

Представлен анализ параметрической модели объектива типа «триплет», определены его основные аберрационные свойства, приводятся примеры современного применения триплета в оптико-информационных системах.

Ключевые слова — объектив, аберрации, оптико-информационные системы.

Введение

Несмотря на долгую историю существования объективов типа «триплет» (первый триплет рассчитан Гарольдом Тейлором для фирмы «Кук» и запатентован в 1894 г. [1]) интерес к этой простой и изящной конструкции не только не ослабевает, но и постоянно растет. Применение новых оптических материалов, использование в качестве дополнительных параметров асферических поверхностей позволили разработать большое количество новых «триплетов» с улучшенными характеристиками. Поэтому авторы считают необходимым еще раз проанализировать свойства этого объектива и его параметрическую модель.

Построение аналитической модели триплета

Известно, что в оптической системе, представленной углами, образованными осевым виртуальным (нулевым) лучом с оптической осью, оптическая сила i -го тонкого компонента (линзы) взаимосвязана с углами α_i и α_{i+1} в пространстве предметов и изображений соответственно соотношением

$$h_i \varphi_i = \alpha_{i+1} - \alpha_i,$$

где h_i — расстояние от оптической оси до точки пересечения виртуального луча с главной плоскостью компонента. Угол $\tilde{\alpha}_i$, образованный тем же лучом с оптической осью в материале линзы, определяет кривизну поверхностей («прогибы»)

линзы. В изображении предмета, образованном тонкой линзой, поперечное увеличение которого равно V_i , астигматизм третьего порядка будет отсутствовать, если входной зрачок расположить от линзы на расстоянии [2]

$$a_{pi} = \frac{(n_i - 1)(V_i - 1)}{n_i + V_i - (n_i + 1)\tilde{\alpha}_i \pm \sqrt{(\tilde{\alpha}_i - n_i)(\tilde{\alpha}_i - n_i V_i)}} \quad (1)$$

где n_i — показатель преломления материала линзы.

Поместив во входном зрачке линзы тонкий двухлинзовый афокальный ($\varphi_1 = -\varphi_2$) компенсатор, получаем оптическую систему, обладающую принципиальной возможностью коррекции сферической аберрации, комы и астигматизма третьего порядка образованного ею изображения. Заменим малый промежуток между линзами компенсатора промежуток конечной длины и будем считать, что $\varphi_1 \neq \varphi_2 \neq \varphi_3$. В результате получим оптическую систему из трех линз типа «триплет». В этом случае при $\alpha_1 = 0$ и $\alpha_4 = 1$ углы $\tilde{\alpha}_2, \tilde{\alpha}_3, \alpha_3$, воздушные промежутки d_1 и d_2 , показатели преломления n_1, n_2, n_3 и коэффициенты дисперсии ν_1, ν_2 и ν_3 материала линз можно считать свободными параметрами и использовать их в качестве коррекционных для взаимной компенсации пяти монохроматических и двух хроматических аберраций образованного рассматриваемой оптической системой изображения.

Оптическую систему, состоящую из трех тонких компонентов, разделенных воздушными промежутками конечной длины, будем называть обобщенным триплетом. При $\alpha_1 = 0, h_1 = 1$ и $\alpha_4 = 1$ условие масштаба представления величин конструктивных параметров рассматриваемой оптической системы из трех тонких компонентов определится выражением вида

$$\varphi_1 + h_2\varphi_2 + h_3\varphi_3 = 1. \quad (2)$$

Положив $h_1 = 1$ и $\alpha_4 = 1$ ($\varphi = 1$), при принятых обозначениях получаем

$$\alpha_2 = h_1\varphi_1 = \varphi_1; \quad (3)$$

$$h_2 = h_1 - \alpha_2 d_1 = 1 - \varphi_1 d_1; \quad (4)$$

$$\alpha_3 = \alpha_2 + h_2\varphi_2 = \varphi_1 + \varphi_2 - \varphi_1\varphi_2 d_1; \quad (5)$$

$$h_3 = h_2 - \alpha_3 d_2 = (1 - \varphi_1 d_1)(1 - \varphi_2 d_2) - \varphi_1 d_2; \quad (6)$$

$$\alpha_4 = \alpha_3 + h_3\varphi_3 = 1. \quad (7)$$

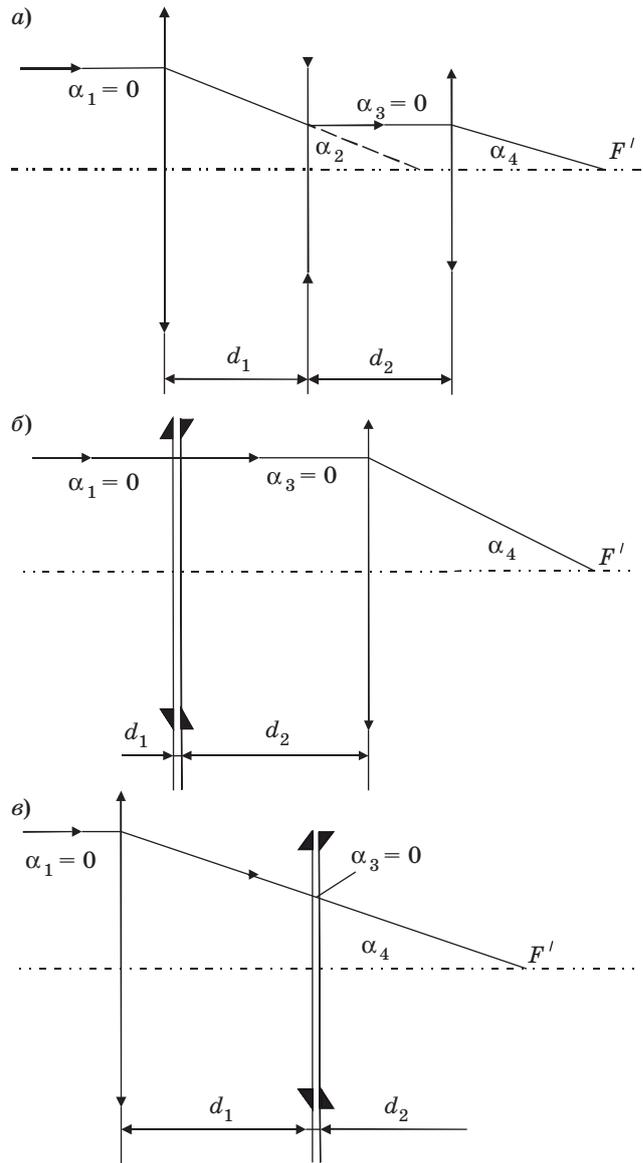
Применив выражения (5) и (6), получаем

$$\varphi_1(1 - \varphi_3 d_2) + \varphi_2(1 - \varphi_1 d_1) + \varphi_3(1 - \varphi_1 d_1)(1 - \varphi_2 d_2) = 1. \quad (8)$$

Выражение (8) определяет условие масштаба. Задний фокальный отрезок системы определяется соотношением

$$s'_{F'} = \frac{h_3}{\alpha_4} = h_3. \quad (9)$$

Формула (8) определяет взаимосвязь всех «воздушных» параметров оптической системы из трех тонких компонентов и, по сути дела, определяет все многообразие оптических систем подобного типа. В частном случае, когда $\alpha_3 = 0$, первые два компонента образуют телескопическую систему (рис. 1, а). При этом, как следует из соотношения (5):



■ Рис. 1. Варианты компоновки триплета: а — первые два компонента, расположенные на значительном расстоянии друг от друга, образуют телескопическую систему; б — первые два компонента, расположенные на минимальном расстоянии друг от друга, образуют афокальный компенсатор; в — афокальный компенсатор образован вторым и третьим компонентами триплета

$$d_1 = f'_1 + f'_2. \quad (10a)$$

Угловое увеличение изображения, образованного полученной таким образом телескопической системой, равно

$$\gamma = -\frac{f'_1}{f'_2} = \frac{1}{1 - \varphi_1 d_1}. \quad (10б)$$

Как следует из выражений (7) и (9), при $\alpha_3 = 0$ задний фокальный отрезок

$$s'_{F'} = h_3 = \frac{1}{\varphi_3}.$$

При $d_1 = 0$ величина $\gamma = 1^*$, а $f'_2 = -f'_1$. При этом телескопическая система преобразуется в тонкий двухкомпонентный афокальный компенсатор остаточных aberrаций третьего компонента (рис. 1, б).

Другой вариант системы из трех тонких компонентов при $\alpha_3 = 0$ можно получить, если принять $\varphi_2 = -\varphi_3$. Заметим, что и в этом случае $h_2 = h_3$, при этом, как следует из выражения (2), $\varphi_1 = 1$. При $d_2 = 0$ рассматриваемая оптическая система из трех тонких компонентов преобразуется в систему с тонким афокальным двухкомпонентным компенсатором aberrаций изображения, образованного первым компонентом, расположенным в сходящемся пучке лучей (рис. 1, в).

Астигматизм третьего порядка изображения определяется разностью координат $z'_s - z'_m$, где z'_s, z'_m — осевые координаты изображения внеосевой точки предмета, образованного узкими пучками лучей в сагиттальной и меридиональной плоскостях соответственно; при этом кривизна поверхности изображения определяется соотношением [3]

$$z'_p = \frac{3z'_s - z'_m}{2}.$$

При $z'_s = z'_m$, т. е. при отсутствии астигматизма в изображении точки, координата $z'_p = z'_s = z'_m$. Заметим, что из этой формулы следует практически важное соотношение $z'_s = -z'_m = \frac{1}{2}z'_p$. В общем случае координата z'_p определяется формулой [3]

$$z'_p = -\frac{1}{2n'} W^2 J^2 S_{IV},$$

где W — угловое поле в пространстве предметов; J — инвариант Лагранжа—Гельмгольца: $J = n'\alpha'l' = n'\alpha'(-\beta_1 f')$; при $n'=1, \alpha'=1, \beta_1=1, J=-f'$.

При $f'=1$ $z'_p = -\frac{1}{2} W^2 S_{IV}$.

Если оптическая система состоит из тонких компонентов, то коэффициент

$$S_{IV} = \sum_{i=1}^{i=m} \left(\sum_{j=1}^{j=\mu} \frac{\varphi_j}{n_j} \right)_i = \sum_{i=1}^{i=m} \frac{\varphi_i}{\tilde{n}_i}, \quad (11)$$

где m — число тонких компонентов; μ — число тонких линз в i -м компоненте; φ_j — оптическая сила j -й линзы в i -м компоненте; n_j — показатель преломления материала j -й линзы; \tilde{n}_i — условный показатель преломления i -го тонкого компонента.

Известно, что хроматическая aberrация положения определяется выражением

$$\delta s'_{xp} = \frac{1}{n'\alpha'^2} S_{Ixp},$$

где

$$S_{Ixp} = -\sum_{i=1}^{i=m} h_i^2 \left(\sum_{j=1}^{j=\mu} \frac{\varphi_j}{v_j} \right)_i = -\sum_{i=1}^{i=m} h_i^2 \frac{\varphi_i}{\tilde{v}_i}, \quad (12)$$

а относительная величина хроматической aberrации увеличения равна $\frac{\Delta y'_{xp}}{y'} = \frac{1}{J} S_{IIxp}$, где

$$S_{IIxp} = -\sum_{i=1}^{i=m} H_i h_i \left(\sum_{j=1}^{j=\mu} \frac{\varphi_j}{v_j} \right)_i = -\sum_{i=1}^{i=m} H_i h_i \frac{\varphi_i}{\tilde{v}_i}. \quad (13)$$

Здесь v_j — коэффициент дисперсии (число Аббе) j -й линзы в i -м компоненте; \tilde{v}_i — условный коэффициент дисперсии i -го тонкого компонента.

При принятой нормировке величин

$$\delta s'_{xp} = S_{Ixp}, \quad \frac{\Delta y'_{xp}}{y'} = -S_{IIxp}.$$

Вполне очевидно [4], что условный коэффициент дисперсии тонкого компонента, состоящего из двух линз, обладающих оптической силой разного знака, может изменяться в интервале $v_{\min} \leq \tilde{v}_i \leq \infty$.

Заметим, что пецвалева кривизна поверхности изображения и хроматические aberrации изображения определяются оптическими силами линз и не зависят от их «прогиба». В случае оптической системы, состоящей из трех тонких компонентов, разделенных воздушными промежутками конечной длины, формулы (11) — (13) можно представить в виде

$$S_{IV} = \frac{\varphi_1}{\tilde{n}_1} + \frac{\varphi_2}{\tilde{n}_2} + \frac{\varphi_3}{\tilde{n}_3}; \quad (14)$$

$$-S_{Ixp} = \frac{\varphi_1}{\tilde{v}_1} + h_2^2 \frac{\varphi_2}{\tilde{v}_2} + h_3^2 \frac{\varphi_3}{\tilde{v}_3}; \quad (15)$$

$$-S_{IIxp} = H_1 \frac{\varphi_1}{\tilde{v}_1} + h_2 H_2 \frac{\varphi_2}{\tilde{v}_2} + h_3 H_3 \frac{\varphi_3}{\tilde{v}_3}. \quad (16)$$

При хорошем исправлении aberrаций положение входного зрачка не влияет на качество изображения. Чтобы упростить вычисления, будем считать, что апертурная диафрагма расположена в плоскости второго компонента. При этом $H_2 = 0$, а высоты H_1 и H_3 удовлетворяют очевидному соотношению

$$\frac{H_1}{d_1} = -\frac{H_3}{d_2}.$$

Отсюда находим, что

$$H_3 = -\frac{d_2}{d_1} H_1.$$

Но $H_1 = a_p \beta_1 = \frac{a'_p \beta_1}{1 - a'_p \varphi_1}$.

При $H_2 = 0$ отрезок $a'_p = d_1$.

При $\beta_1 = 1$ получаем

$$H_1 = \frac{d_1}{1 - \varphi_1 d_1} = \frac{d_1}{h_2}$$

и, соответственно, $H_3 = -\frac{d_2}{h_2}$. Полученные соотношения, а также формулы (4) и (6) позволяют исключить из формул (2) и (15) — (17) величины h_i и H_i .

В случае системы, состоящей из трех тонких линз, профессор Г. Г. Слюсарев дополнил формулы (14) — (16) приближенным выражением вида [5]

$$3,65 \left(H_1 \varphi_1 + \frac{H_2 \varphi_2}{h_2} + \frac{H_3 \varphi_3}{h_3} \right) = S_V. \quad (17)$$

Реализация параметрической модели обобщенного триплета

Если считать, что материалы линз выбраны или заданы, то в полученных пяти уравнениях (2), (14) — (17) неизвестными остаются пять величин: $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, d_1$ и d_2 , — найти которые весьма не просто, поскольку уравнения нелинейны относительно указанных неизвестных. В этой связи Г. Г. Слюсарев отмечает [5], что математическая трактовка приводит в большинстве случаев к решениям, не имеющим практического значения, так как соответствующие этим решениям конструкции неосуществимы. Предлагаемая авторами методика, основанная на известной теории [5], позволяет получить приемлемые решения при изменении значения одной из сумм в выражениях (14) — (17) на ничтожно малую величину. Такой искусственный прием дает в результате решения реальную систему конструктивных элементов триплета. В качестве иллюстрации в таблице приведены конструктивные элементы

■ Конструктивные элементы триплета

Номер поверхности	Радиус, мм	Толщина, мм	Марка стекла	Показатель преломления n_d	Коэффициент дисперсии ν_d
0					
1	30,00	5,70	ТК16	1,6128	58,22
2	1100,00	6,20	Воздух	—	—
3	-74,00	1,90	БФ12	1,6259	39,11
4	30,00	10,30	Воздух	—	—
5	175,00	3,80	ТК16	1,6128	58,22
6	-35,73	60,37	—	—	—
Изображение					

оптической системы, рассчитанной по этому методу. Схема и aberrации системы представлены на рис. 2 (см. с. 3 обложки).

Для этой системы при $f' = 1$ $S_{IV} = 0,421$, $S_{Ixp} = -0,00444$, $S_{IIxp} = 0,00047$.

Применив формулу $\beta_{i+1} - \beta_i = H_i \varphi_i$, находим, что при $\beta_1 = 1$ угловое увеличение в изображении зрачков

$$\gamma_p = \frac{\beta_4}{\beta_1} = 1 + H_1 \varphi_1 + H_3 \varphi_3 = 1 + \frac{H_1}{d_1} (d_1 \varphi_1 - d_2 \varphi_3).$$

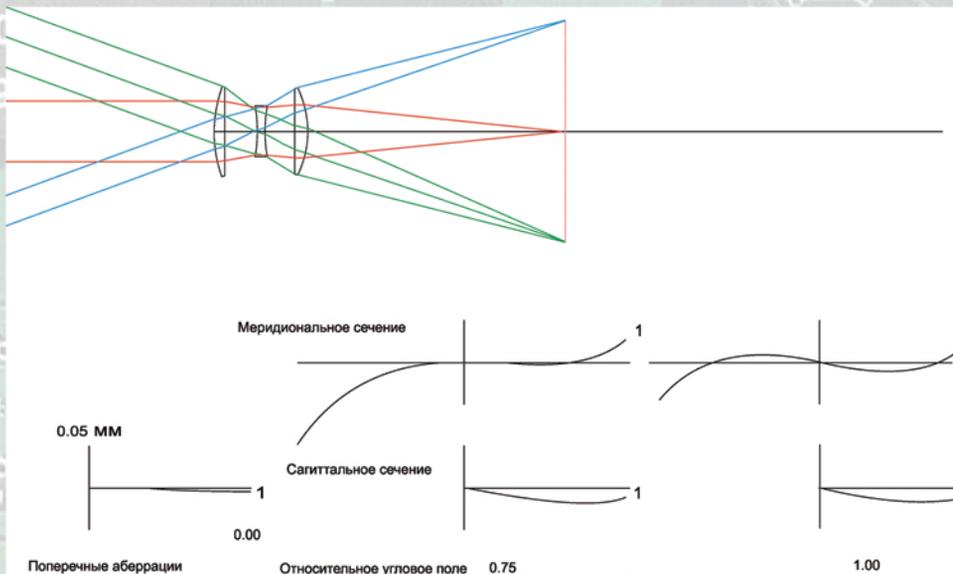
Это выражение можно записать в виде [5]

$$d_1 \varphi_1 - d_2 \varphi_3 - \chi = 0, \quad (18)$$

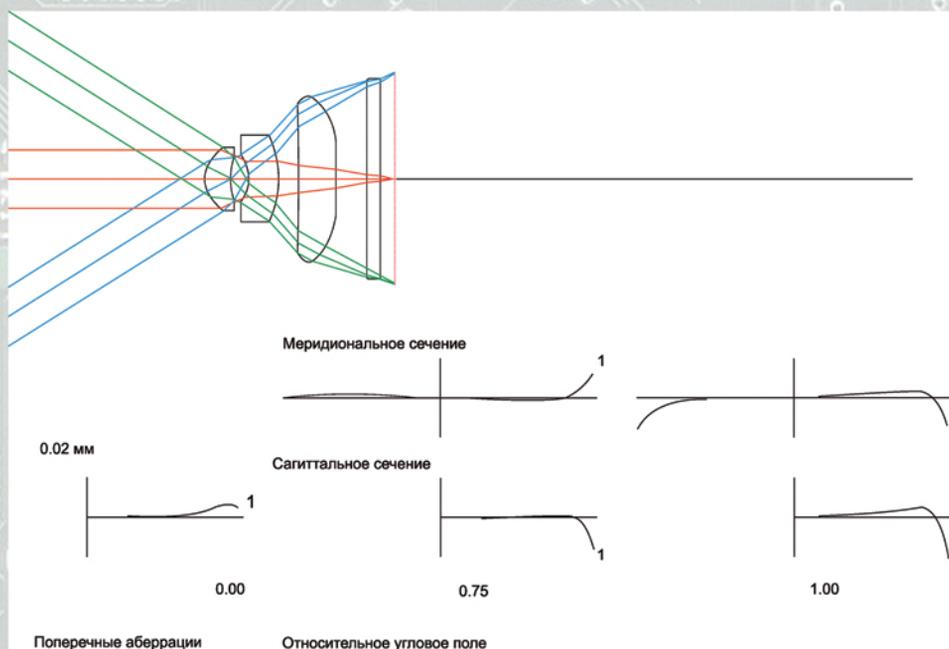
где β_i, β_{i+1} — углы, образованные главными виртуальными (нулевыми) лучами с оптической осью триплета, а величина $\chi = \frac{\gamma_p - 1}{h_2}$.

Известно, что дисторсия изображения, образованного рассматриваемой системой, определяется отступлением от условия синусов и сферической aberrацией в изображении зрачков. Если условие синусов в изображении зрачков соблюдается и сферическая aberrация отсутствует, то только при $\gamma_p = 1^*$ отношение синусов равно отношению тангенсов соответствующих углов и дисторсия в изображении отсутствует. Именно этим определяются коррекционные возможности изменения величины χ , названной М. Береком [6] поправочным членом, влияющим на устранение дисторсии изображения. Заметим, что угловое увеличение в зрачках $\gamma_p = 1^*$ остается неизменным, если соблюдается соотношение $\frac{d_1}{d_2} = \frac{\varphi_3}{\varphi_1}$. Поскольку ход лучей световых пучков через первую

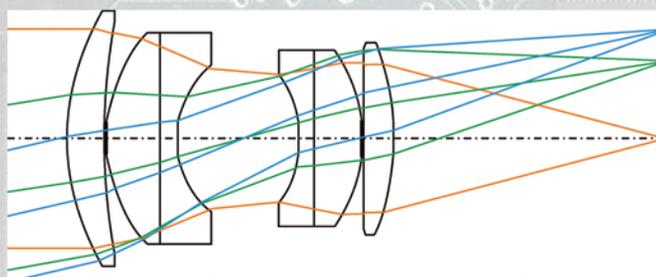
Иллюстрации к статье Р. В. Анитропова, И. Г. Бронштейна, В. Н. Васильева,
 В. А. Зверева, И. Л. Лившиц, М. Б. Сергеева, Унчун Чо
 «Анализ параметрической модели обобщенного триплета и его применение
 в оптико-информационных системах», с. 6–13



■ Рис. 2. Оптическая схема и aberrации триплета



■ Рис. 5. Оптическая схема и графики остаточных aberrаций объектива триплета с асферическими поверхностями



■ Рис. 6. Объектив Гаусса

и третью линзу симметрией относительно средней линзы не обладает, это соотношение может оказаться полезным в процессе поиска варианта сочетания конструктивных параметров из условия наилучшей коррекции aberrаций широкого и узкого пучков лучей.

Рассматриваемую систему уравнений М. Берек назвал системой условий, дополнив ее условием [6]

$$d_1 + d_2 = L, \quad (19)$$

где L — длина триплета. Кроме того, в систему включено условие (18) вместо выражения (17). Представленная система содержит в шести условиях восемь независимых переменных: $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \nu_1, \nu_2, \nu_3, d_1, d_2$ — двумя из которых можно распорядиться. Берек приводит приближенные соотношения, облегчающие решение этих сложных аналитических выражений. Применение метода показано на примере расчета, в результате которого получена следующая оптическая система:

$$\varphi_1 = 2, n_1 = 1,553, \nu_1 = 50;$$

$$\varphi_2 = -3,44, n_2 = 1,631, \nu_2 = 30,2;$$

$$\varphi_3 = 2, n_3 = 1,625, \nu_3 = 43,8;$$

$$d_1 = 0,1, d_2 = 0,1; h_2 = 0,8, h_3 = 0,875.$$

Применив соответствующие соотношения, для этой системы получаем

$$S_{Ixp} = 0,002, S_{IIxp} = 0,010, S_{IV} = 0,410.$$

Из соотношения (14) следует, что

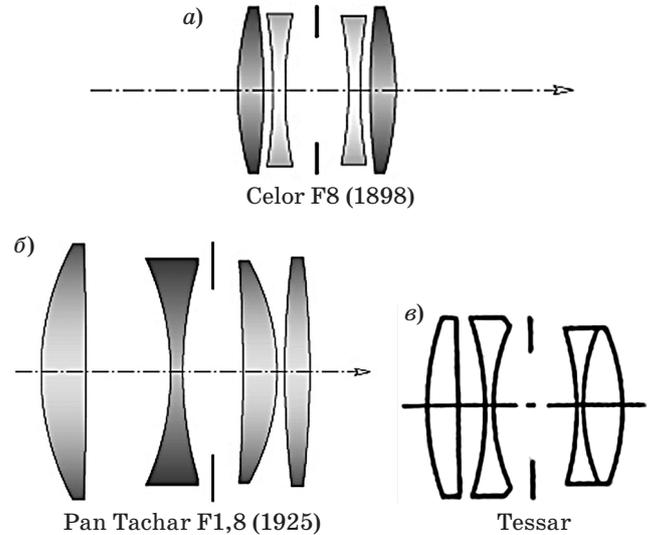
$$\varphi_2 = n_2 S_{IV} - \frac{n_2}{n_1 n_3} (n_3 \varphi_1 + n_1 \varphi_3).$$

Пусть $S_{IV} = 0$. Тогда при $\varphi_1 > 0$ и $\varphi_3 > 0$ оптическая сила $\varphi_2 < 0$, причем при $n_1 < n_2$ и $n_3 < n_2$ величина $|\varphi_2| > \varphi_1 + \varphi_3$. Таким образом, средняя линза триплета обладает наибольшей абсолютной величиной оптической силы. Поэтому естественно предположить, что именно эта линза является причиной появления aberrаций высших порядков.

Развитие схемы обобщенного триплета

В результате замены средней линзы триплета двумя линзами вблизи апертурной диафрагмы, расположенной между ними, появился объектив Celor (рис. 3, а), первый советский аналог этого объектива — «Ортагоз» — разработан профессором И. А. Турыгиным. Этот объектив, также рассчитанный по схеме триплета, пользовался большой популярностью в 30-х годах прошлого столетия.

Были и другие попытки усовершенствовать триплет. Такие фирмы, как Astrohezelshaft, выпускавшая объективы Tachar, и фирма



■ Рис. 3. Варианты развития схемы объектива триплета: а — объектив Celor / «Ортагоз»; б — объектив Tachar (1925) / объектив Слюсарева (1922); в — объектив Tessar / «Индустар»; F — диафрагменное число

Bausch&Lomb заменили базовую линзу двумя тонкими линзами. Объектив подобного типа, схема которого представлена на рис. 3, б, в 1922 г. был разработан Г. Г. Слюсаревым.

Наиболее удачным усовершенствованием схемы триплета была замена простой базовой линзы двойной склеенной (рис. 3, в). Среди объективов такого типа самым распространенным является объектив Tessar, разработанный в 1902 г. сотрудником фирмы «К. Цейсс» доктором П. Рудольфом. Построенные в соответствии с этой оптической схемой, объективы непрерывно совершенствуются и выпускаются в разных странах под разными названиями: «Индустар» (Россия), Ektar (фирма Kodak, США), Elmar (фирма Leitz, Германия), Xenar (фирма Schneider, Германия) и др. Триплеты встречаются и в ранних модификациях фотокамер Rolleiflex TLR, Zeiss Ikonta, Voigtlander Brilliant, китайском Seagull 4A-105, отечественном фотоаппарате «Любитель».

Рассмотрим еще несколько важных соотношений, позволяющих обеспечить оптимальное распределение оптических сил компонентов триплета с точки зрения его aberrационной коррекции.

Из соотношений (4) и (6) следует, что

$$d_1 = \frac{1 - h_2}{\varphi_1}; \quad (20)$$

$$d_2 = \frac{h_2 - h_3}{\varphi_1 + h_2 \varphi_2}. \quad (21)$$

Подставив эти соотношения в выражение (18), получаем

$$(1 - h_2 - \chi)\varphi_1 + h_2(1 - h_2 - \chi)\varphi_2 - (h_2 - h_3)\varphi_3 = 0. \quad (22)$$

Будем считать уравнения (2), (14) и (22) линейными относительно величин φ_1 , φ_2 и φ_3 . Тогда в соответствии с формулами Крамера [7]

$$\varphi_1 = \frac{D_1}{D}; \varphi_2 = \frac{D_2}{D}; \varphi_3 = \frac{D_3}{D},$$

где D_j — определитель. Определитель рассматриваемой системы уравнений можно преобразовать к виду

$$D = h_2 \left(1 - h_3 - \chi \frac{h_3}{h_2} \right) \left(\frac{h_2}{n_1} - \frac{1}{n_2} \right). \quad (23)$$

Соответственно находим, что определитель

$$D_{\varphi_3} = (1 - h_2 - \chi) \left(\frac{h_2}{n_1} - \frac{1}{n_2} \right), \quad (24)$$

при этом

$$\varphi_3 = \frac{D_{\varphi_3}}{D} = \frac{1 - h_2 - \chi}{h_2 \left(1 - h_3 - \chi \frac{h_3}{h_2} \right)}. \quad (25)$$

Умножим уравнение (14) на n_1 и вычтем его из уравнения (2). В результате получим уравнение, содержащее величины φ_2 и φ_3 . Из этого уравнения находим, что

$$\varphi_2 = \frac{1 - n_1 S_{IV} - \left(h_3 - \frac{n_1}{n_3} \right) \varphi_3}{h_2 - \frac{n_1}{n_2}}. \quad (26)$$

Тогда в соответствии с выражением (2) величина

$$\varphi_1 = 1 - h_2 \varphi_2 - h_3 \varphi_3. \quad (27)$$

Применив соотношения, определяющие H_1 и H_3 , а также соотношение (18), преобразуем выражение (16) к виду

$$\frac{\tilde{v}_3}{\tilde{v}_1} = \frac{h_3 \left(1 - \frac{\chi}{d_1 \varphi_1} \right)}{1 + \frac{\tilde{v}_1 h_2}{d_1 \varphi_1} S_{IIxp}}. \quad (28)$$

Применив соотношение (20), формулу (28) можно представить в виде

$$\frac{\tilde{v}_3}{\tilde{v}_1} = \frac{h_3(1 - h_2 - \chi)}{1 - h_2 + \tilde{v}_1 h_2 S_{IIxp}}. \quad (29)$$

Из выражений (28) и (29) следует, что при $S_{IIxp} = 0$ и $\chi = 0$ величина $h_3 = s'_{F'} = \frac{\tilde{v}_3}{\tilde{v}_1}$. Если при этом

$\tilde{v}_3 = \tilde{v}_1$, то в соответствии с формулой (25) оптическая сила $\varphi_3 = \infty$. Но если $\chi \neq 0$, то

$$\varphi_3 = \frac{D_{\varphi_3}}{D} = \frac{1 - h_2 - \chi}{-\chi}. \quad (30)$$

С другой стороны, если $h_3 = h_2$, то независимо от величины χ оптическая сила $\varphi_3 = 1/h_2$. Если сколь угодно малым изменениям исходных данных могут соответствовать большие изменения решения, то такие задачи принято считать некорректными (точнее, некорректно поставленными) или плохо обусловленными. Следовательно, к таким задачам можно отнести и задачу расчета триплета.

Выражение (15) можно преобразовать к виду

$$\frac{\tilde{v}_2}{\tilde{v}_1} = \frac{h_2^2 \varphi_2}{-\varphi_1 - \frac{\tilde{v}_1}{\tilde{v}_3} h_3^2 \varphi_3 - \tilde{v}_1 S_{Ixp}}. \quad (30)$$

Применив формулу (2), при $h_3 = \frac{\tilde{v}_3}{\tilde{v}_1}$ получаем

$$\frac{\tilde{v}_2}{\tilde{v}_1} = \frac{h_2^2 \varphi_2}{h_2 \varphi_2 - 1 - \tilde{v}_1 S_{Ixp}}. \quad (31)$$

Если величина h_3 определяется, главным образом, отношением $\frac{\tilde{v}_3}{\tilde{v}_1}$, то величина h_2 входит параметром в формулы (25) — (27), (29) и (31), определяющие конструктивные параметры рассматриваемой оптической системы. Таким образом, задача расчета триплета решается, если величину h_2 считать свободным параметром. При этом в случае оптической системы из трех тонких линз вид формул (25), (26), (29) и (31) позволяет сделать наиболее целесообразный подбор параметров материала линз триплета. В численном примере [8] решена задача расчета триплета при $S_{Ixp} = 0$, $S_{IIxp} = 0$, $S_{IV} = 0,25$, $\chi = 0$. Материалами линз выбраны стекла: ТК9 ($n_{e1} = 1,61993$, $v_{e1} = 53,76$), ТФ2 ($n_{e2} = 1,67762$, $v_{e2} = 31,99$), БФ25 ($n_{e3} = 1,61085$, $v_{e3} = 45,82$). В соответствии с формулой (29) находим

$$h_3 = s'_{F'} = \frac{v_{e3}}{v_{e1}} = 0,852.$$

Пусть $h_2 = 0,75$. Подставив эти значения h_2 и h_3 в формулу (25), получаем $\varphi_3 = 2,25$. Применяя формулу (26), находим, что $\varphi_2 = -4,36$.

Подставив полученные величины в выражение (31), находим коэффициент дисперсии материала второй линзы: $v_{e2} = 30,88$. Полученная величина v_{e2} не равна коэффициенту дисперсии стекла ТФ2. Из формулы (31) находим, что

$$S_{Ixp} = \frac{1}{v_1} (h_2 \varphi_2 - 1) - \frac{1}{v_2} h_2^2 \varphi_2.$$

При $v_2 = v_{e2} = 31,99$ получаем $S_{Ixp} = 0,016$. Чтобы уменьшить величину этого коэффициента, внесем поправку в значение параметра h_2 . Вы-

полним это следующим образом. Полагая $S_{Ixp} = 0$, продифференцируем выражение (31):

$$dv_2 = v_1 h_2 \varphi_2 \frac{h_2 \varphi_2 - 2}{(h_2 \varphi_2 - 1)^2} dh_2 - \frac{v_1 h_2^2}{(h_2 \varphi_2 - 1)^2} d\varphi_2. \quad (32)$$

В результате дифференцирования выражения (26) и выражения (25) при $\chi = 0$ получаем

$$d\varphi_2 = -\frac{1}{h_2 - \frac{n_1}{n_2}} \left[\left(h_3 - \frac{n_1}{n_3} \right) d\varphi_3 + \varphi_2 dh_2 \right]; \quad (33)$$

$$d\varphi_3 = -\frac{dh_2}{h_2^2(1 - h_3)}. \quad (34)$$

Соотношения (33) и (34) позволяют выражение (32) преобразовать к виду

$$dv_2 = \frac{v_1}{(h_2 \varphi_2 - 1)^2} \times \left[\frac{1}{h_2 - \frac{n_1}{n_2}} \left(\frac{h_3 - \frac{n_1}{n_3}}{h_3 - 1} + h_2^2 \varphi_2 \right) + h_2 \varphi_2 (h_2 \varphi_2 - 2) \right] dh_2.$$

Вид этого выражения существенно упрощается, если в первом приближении принять $n_1 = n_2 = n_3$. Заменяя при этом дифференциалы конечными разностями, получаем интерполяционную формулу в виде

$$\Delta v_2 = \frac{v_1}{(h_2 \varphi_2 - 1)^2} \left[\frac{1 + h_2^2 \varphi_2}{h_2 - 1} + h_2 \varphi_2 (h_2 \varphi_2 - 2) \right] \Delta h_2. \quad (35)$$

Подставив в эту формулу значения величин из рассматриваемого примера, получаем $\Delta h_2 = 0,016$. При $h_2 = 0,716$ получаем $\varphi_1 = 2,742$, $\varphi_2 = -4,570$, $\varphi_3 = 2,064$; $d_1 = 0,085$, $d_2 = 0,113$. Подставив полученные значения величин в формулу (31), при $S_{Ixp} = 0$ находим, что $v_2 = 32,02$. Тогда при $v_2 = v_{e2} = 31,99$ получаем $S_{Ixp} = 0,0001$. Решим эту же задачу при $S_{IV} = 0$. В этом случае при уточненном значении $h_2 = 0,732$ получаем $\varphi_1 = 3,217$, $\varphi_2 = -5,908$, $\varphi_3 = 2,474$; $d_1 = 0,083$, $d_2 = 0,108$; $S_{Ixp} = 0$.

Из формулы (26) следует, что чем меньше величина коэффициента S_{IV} , т. е. чем меньше кривизна поверхности изображения, тем больше абсолютная величина оптической силы каждой линзы, при этом оптическая сила второй линзы достигает значений, при которых трудно рассчитывать на получение оптической системы, формирующей изображение приемлемого качества, при достаточно высоком относительном отверстии (выше, чем 1 : 4). Этот вывод вполне подтверждают параметры системы последнего примера.

Современные конструкции триплетов

Проверенные временем объективы типа «триплет» досрости до сложнейших современных оптических систем.

Так, триплеты с улучшенными характеристиками используются в качестве объективов биноклей и любительских телескопов, например, эстонско-итальянская фирма William Optics изготавливает высококачественные объективы-триплеты, у которых положительные линзы выполнены из специального флюоритового стекла (FPL-53), при этом за счет специфики примененного оптического материала с высоким коэффициентом дисперсии удается полностью исправить хроматические аберрации.

Триплеты применяются и в качестве луп (рис. 4), они обладают высоким качеством изображения и рассчитываются с увеличением от 10 до 30 крат.

Триплеты с асферическими поверхностями используются в качестве объективов камер для мобильных телефонов (рис. 5 см. с. 3 обложки). Объектив имеет следующие технические характеристики: фокусное расстояние 3,8 мм, относительное отверстие 1 : 2,8; угловое поле в пространстве предметов $2W = 65^\circ$.

Аналогичные триплеты, но с вынесенным вперед входным зрачком находят широкое применение в устройствах видеонаблюдения.

Современные оптико-информационные системы включают в себя множество устройств, объединенных тем, что информация, «собираемая» объективом, поступает на светочувствительный материал приемника изображения (матрицу или систему матриц у цифровых приемников изображения). Информация, полученная таким способом, может обрабатываться и сохраняться на различных носителях — флэш-памяти, оптических дисках, дискетах и др. Примерами таких систем являются видеозаписывающая аппаратура, цифровые фотоаппараты (видеокамеры), web-камеры и др.

Например, оптико-информационная система цифрового аппарата известной фирмы Canon, объектив которой, имеющий эффективное фокусное расстояние (EFL) 50 мм, F1.8, был разработан на основе схемы обобщенного триплета. В этом



■ Рис. 4. Внешний вид современной лупы типа триплет

объективе хорошо исправлена аберрация — кома, в результате он стал исторической вехой в создании объективов благодаря резкому улучшению качества изображения, которое он обеспечивает.

Canon по-прежнему использует конструкцию обобщенного триплета, известного под именем объектива Гаусса (рис. 6 см. с. 3 обложки), в современных объективах, таких как EFL 50 мм, F1.8; EFL 50 мм, F1.0; EFL 50 мм, F1.4; EFL 85 мм, F1.2; EFL 90 мм, F2.8.

Заключение

Результаты выполненного анализа параметрической модели обобщенного триплета позволяют сделать вывод о том, что практически возможно обоснованное определение параметров оптической системы, исходной для последующего аберрационного расчета. Однако эти результаты убеждают и в том, что многопараметрическая система из трех тонких линз обладает достаточно

ограниченными коррекционными возможностями. Поэтому для практического применения необходимо усложнение конструкции этой системы путем замены отдельных линз тонким компонентом из двух линз (метод «дробления» компонентов). При этом оптические силы этих компонентов могут быть как одного, так и разных знаков, причем в последнем случае материалы линз могут иметь разные показатели преломления и коэффициенты дисперсии, а сам компонент может иметь различные значения корригируемых параметров (например, параметров P и W в области аберраций третьего порядка).

Из представленного анализа можно сделать вывод, что коррекционные возможности обобщенного триплета до конца не использованы, его классическая оптическая схема в сочетании с современными технологиями все еще предоставляет оптикам-разработчикам большие возможности по созданию современных высококачественных объективов.

Литература

1. Патент Великобритании № 22607 (GB189322607).
2. Гаврилюк А. В., Лившиц И. Л. Простые оптические апланатические системы // ОМП. 1990. № 4. С. 14–18.
3. Зверев В. А. Основы геометрической оптики: учеб. пособие. СПб.: СПб ГИТМО (ТУ), 2002. 218 с.
4. Слюсарев Г. Г. Методы расчета оптических систем. — Л.: Машиностроение, 1969. — 672 с.
5. Слюсарев Г. Г. Расчет оптических систем. — Л.: Машиностроение, 1975. — 672 с.
6. Берек М. Основы практической оптики. — М.-Л.: ГТТИ, 1933. — 136 с.
7. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике для инженеров и учащихся ВТУЗов. — М.: ГИТТЛ, 1957. — 608 с.
8. Волосов Д. С. Фотографическая оптика: учеб. пособие для киновузов. — М.: Искусство, 1978. — 543 с.

УДК 004.946

МЕТОД АДАПТИВНОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ИНТЕРАКТИВНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕД С ПОГРУЖЕНИЕМ

О. В. Мухина,

ассистент

А. В. Никитин,

канд. техн. наук, доцент

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Предложен новый способ адаптации содержимого сцены интерактивной электронной среды с погружением к особенностям пользователя (знания, навыки, сенсорика, моторика и др.), позволяющий повысить эффективность взаимодействия пользователя с прикладной системой, ориентированной на решение определенного класса задач.

Ключевые слова — адаптация, интерактивность, погружение, электронные среды.

Введение

Повышение эффективности деятельности пользователя связано с такими факторами, как непосредственное взаимодействие с объектом деятельности, вовлечение в рабочий процесс всех органов чувств и моторики человека, а также поддержка совместной работы.

Одно из перспективных решений, реализующее вышеуказанные свойства, — создание интерактивных электронных сред с погружением (ИЭСП), поддерживающих погружение человека в определенную среду и участие в событиях этой среды с учетом его индивидуальных особенностей — перцептивных, двигательных, познавательных, личностных и др. [1].

Как правило, ИЭСП ориентированы на массовую аудиторию, поэтому не поддерживают веду-

щий канал восприятия конкретного пользователя и его полное сенсорное погружение. Частично эти проблемы решают путем равномерной нагрузки одной и той же семантикой используемых в ИЭСП каналов восприятия, а также восполнения недостающих каналов за счет синестезии. Однако принципиальное увеличение функциональных возможностей ИЭСП связано с их индивидуализацией на основе адаптации. Адаптивные ИЭСП — это новое направление исследований в области перспективных информационно-коммуникационных технологий.

Основные методы адаптации разработаны для гипермедиа-систем и представлены в работах П. Брусиловского [2, 3]. Адаптивные гипермедиа-системы отражают некоторые характеристики пользователя в модели пользователя и применяют эту модель для адаптации различных визу-

■ Сравнение гипермедиа и ИЭСП

Характеристика	Технологии	
	Гипермедиа	ИЭСП
Общее представление	Страница	3D-пространство
Медиа-контент	Текст, изображение, анимация, звук, видео	3D-модели и связанные с ними текст, изображение, анимация, звук, видео
Структурная организация	Граф страниц	3D-пространство или граф 3D-пространств
Навигация	Гиперсвязи	Перемещения в 3D-пространстве (обход, облет, телепортация за счет гиперсвязей)
Дополнительные свойства	Заполнение форм и др.	Манипуляции 3D-объектами (выделение, перемещение и др.) Мультимодальность

альных и других аспектов системы к нуждам пользователя. В адаптивной гипермедиа может быть адаптировано как содержание очередной страницы (адаптивное представление), так и ссылки с очередной страницы (адаптивная поддержка навигации). Адаптивная гипермедиа нашла широкое применение в онлайн-информационных системах, системах оперативной помощи, поисковых системах, в компьютерном обучении [4] и др.

Имеются существенные отличия ИЭСП от гипермедиа-систем (таблица), что обуславливает разработку соответствующих методов адаптации.

В настоящее время активно обсуждаются различные подходы и разрабатываются новые методы адаптации 3D-Web-сайтов к пользователю. В настоящее время активно обсуждаются различные подходы и разрабатываются новые методы адаптации 3D-Web-сайтов к пользователю, в частности персонализация контента для электронной коммерции [5, 6] и виртуальных музеев [7], навигации [8, 9], и представления контента [10].

Тем не менее, проблема управления ИЭСП в зависимости от поведения пользователя при решении поставленной задачи остается не достаточно исследованной.

Описание предлагаемого метода адаптивного представления сцены ИЭСП

Основным функционально-структурным элементом ИЭСП является мультимодальная сцена (в простейшем случае — хотя бы трехмерная с шестью степенями свободы). Применительно к ИЭСП основная идея адаптивного представления состоит в том, чтобы адаптировать содержание сцены, с которой взаимодействует пользователь в процессе решения некоторой задачи, к его текущим характеристикам — уровню знаний, целям, умениям, сенсорике, моторике и др.

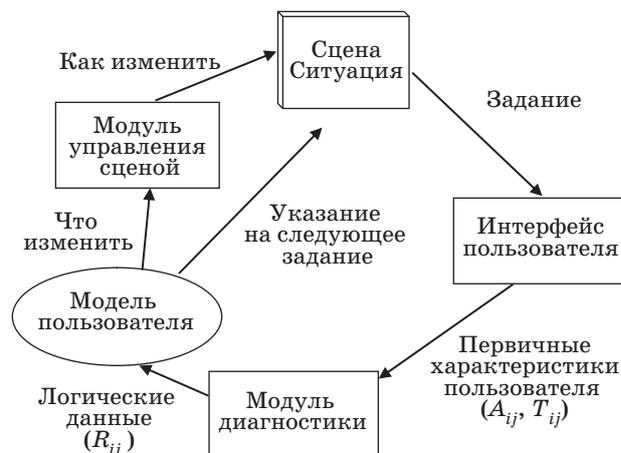
Предполагается, что адаптация предназначена для поддержки пользователя только в случае, если он не справляется с решаемой задачей самостоятельно.

Обобщенная схема метода адаптации сцены приведена на рисунке.

Таким образом, модель адаптации можно представить как

$$MA = (C, ИП, МД, МП, МУС).$$

Рассмотрим компоненты модели более подробно. Сцена (С) представляет собой 3D-пространство с шестью степенями свободы и состоит из объектов, камер и источников освещения, которые име-



■ Схема метода адаптации сцены ИЭСП

ют определенные характеристики и поведение, заданные решаемой задачей.

Взаимодействие пользователя со сценой определяется сценарием решаемой задачи и осуществляется через интерфейс пользователя (ИП), который обеспечивает отображение состояний среды и регистрацию действий пользователя. ИП реализуется технически с использованием средств доступа к ИЭСП (в минимальной вариации это монитор, мышь, клавиатура), через которые пользователь осуществляет взаимодействие со сценой.

Модуль диагностики (МД) определяет некоторые характеристики пользователя в процессе решения задачи (выполнения задания), например время реакции, степень выполнения и др., на основе анализа которых принимается решение о запуске механизма адаптации. Эти первичные параметры взаимодействия преобразуются в логические данные для занесения в модель пользователя.

Модель пользователя (МП) предназначена для хранения характеристик пользователя. В общем случае она может быть задана оверлейной моделью [2], при графовом описании которой вершины представляют собой некоторые концепты предметной области, где решаются задачи, а ребра — отношения между концептами. В случае запуска адаптации МП определяет, что должно быть изменено в сцене, а также в сценарии решения задачи.

Модуль управления сценой (МУС) изменяет характеристики и поведение компонентов сцены, определенных МП, например делает видимый объект невидимым или наоборот, включает или отключает освещение, изменяет ракурс или ориентацию камеры, меняет поведение какого-либо объекта и т. п. Как правило, реализуется средствами платформы, на которой разработано при-ложение.

Пример реализации предлагаемого подхода

Одним из примеров использования подхода является экспериментальная ИЭСП для преподавания русского языка как иностранного, разработанная специалистами ГУАП и преподавателями филологического факультета СПбГУ [1].

Приложение предназначено для повышения языковой компетентности обучаемых за счет участия их в ориентированных на изучение языка игровых ситуациях, представленных в форме ИЭСП на платформе *Virtools*, а также для демонстрации возможностей альтернативных систем образования и развития новых форм сетевого общения, обучения и работы.

Приложение включает набор интерактивных трехмерных моделей зданий СПбГУ (здания Двенадцати коллегий, здания спецфакультета), некоторых помещений (деканат, библиотека, музей, коридор и др.), прилегающей территории и персонажей с анимациями (ходьба, бег, жесты, мимика и др.), представляющих пользователей и управляемых ими. На базе моделей реализованы различные учебные ситуации, например: «На экскурсии по университету», «В библиотеке», «В музее университета», «В деканате» и др.

Используются следующие режимы индивидуальной или групповой работы:

— лекция — пассивный просмотр аудиовизуального обучающего ролика, демонстрирующего, как правило, диалог и поведение персонажей на заданную тему внутри модели университета;

— практика — свободное перемещение по модели;

— контроль — пользователь, управляя персонажем, отвечает на контрольные вопросы.

Активное участие пользователей в виртуальной среде (передвижение, аудирование, чтение, ответная поведенческая реакция на вопросы и задания, указание и др.) реализуется в режимах практика и контроль, в которых пользователь от пассивного восприятия переходит к активным действиям в ИЭСП. Именно в этих режимах возможна реализация алгоритма адаптации.

Рассмотрим формирование модели адаптивного представления сцены за счет изменения уровня ее детализации на примере режима контроля для ситуации «Экскурсия по университету».

Пользователю последовательно выдаются контрольные задания, например:

- подойдите к памятнику М. В. Ломоносову;
- пройдите в библиотеку;
- зайдите в деканат;
- подойдите к мемориальной доске А. Блоку

и т. п.

Каждому заданию соответствует компонент сцены, представляющей 3D-модель университета.

Пользователь, управляя персонажем от 1-го или 3-го лица, должен выполнить задание за отведенное для него время, которое, например, пропорционально расстоянию от текущего положения пользователя в модели до искомого объекта.

Механизм адаптации срабатывает в случае, если пользователь по каким-либо причинам (закончилось отведенное время, не знает местоположение объекта и др.) не выполнил задание.

Задача адаптивного представления сцены заключается в управлении уровнем детализации сцены в зависимости от поведения пользователя при выполнении задания. Предполагается, если пользователь не может найти требуемый объект в сцене, то в качестве помощи в его нахождении сцена упрощается, например, незначимые объекты удаляются, некоторые заслоняющие искомым объект элементы сцены становятся прозрачными, меняются характеристики и поведение каких-либо объектов и т. п.

Модель пользователя в данном случае будет представлять собой связный граф, вершины которого — объекты сцены, которые необходимо найти, а ребра — отношения типа «состоит из», «входит в», «видимость» и др. Каждая вершина метится вектором, включающим значения двух параметров — достиг или нет пользователь данного объекта, а также затраченное время.

Если пользователь не нашел заданный объект, то в соответствии с принятым правилом детализации сцены (в нашем случае — высокий и низкий) запрещается доступ на определенное время к вершинам графа, соответствующим высокому уровню детализации, и генерируется новый перечень вопросов, соответствующий оставшимся непройденным объектам сцены, относящимся к низкому уровню.

Приведем алгоритм управления уровнем детализации сцены в зависимости от поведения пользователя при выполнении задания.

Шаг 1. Пользователь получает задание 1 (например, подойдите к мемориальной доске А. Блоку), соответствующее сцене с высоким уровнем детализации.

Шаг 2. По истечении отведенного на ответ времени или выполнении пользователем поставленной задачи ИП передает первичные характеристики (время реакции, достигнут или нет объект) в МД.

Шаг 3. МД обрабатывает полученную информацию и формирует логические данные R_{ij} (оценка/рейтинг, время) для передачи в МП.

Шаг 4. В МП записываются полученные логические данные. При $R_{ij} = 1$ пользователь переходит к следующему заданию. При $R_{ij} = 0$ считаем, что пользователь не справился с заданием, и на основе МП определяются компоненты сцены для

уменьшения уровня детализации сцены для конкретной ситуации и задания.

Шаг 5. МУС на платформе Virtools генерирует сцену с уровнем детализации, определенным МП (например, делает объекты видимыми или не видимыми для пользователя).

Шаг 6. Пользователю дается возможность выполнить то же задание, но в сцене с новым уровнем детализации.

Предлагаемый метод использовался также в интерактивных электронных технических руководствах для обслуживания и ремонта корабельных комплексов при трехмерном моделировании сборки/разборки судовых агрегатов.

Заключение

Предложен метод адаптивного представления сцены, отличающийся от известных возможностью изменять характеристики и поведение объектов сцены ИЭСП в зависимости от особенностей поведения пользователя в процессе решения поставленной задачи.

Практическая ценность от реализации метода заключается в предоставлении помощи пользователю при решении задачи, а также индивидуализации процесса его взаимодействия с приложением, разработанным в форме ИЭСП.

Литература

1. **Архитектура виртуальных миров** / Под ред. М. Б. Игнатъева, А. В. Никитина, А. Е. Войскунского. — ГУАП. СПб., 2009. — 238 с.
2. **Brusilovsky P.** Adaptive Hypermedia // User Modeling and User-Adapted Interaction. 2001. <http://www.springerlink.com/content/ln3j16077v24k774/fulltext.pdf> (дата обращения: 15.11.2009).
3. **Brusilovsky P.** Methods and techniques of adaptive hypermedia. 1996. <http://www.springerlink.com/content/x33q23n15373k164/fulltext.pdf> (дата обращения: 15.11.2009).
4. **Зайцева Л. В.** Модели и методы адаптации в системах компьютерного обучения // Тр. X Всерос. науч.-метод. конф. «Телематика 2003», Санкт-Петербург, 14–17 апреля 2003 г./ СПбГИТМО. СПб., 2003. Т. 2. С. 502–503.
5. **Chittaro L., Ranon R.** New Directions for the Design of Virtual Reality Interfaces to E-Commerce Sites: Proc. of the 5th Intern. Conf. on Advanced Visual Interfaces (AVI 2002), Trento, Italy: ACM Press, 2002. P. 308–315.
6. **Chittaro L., Ranon R.** Adding Adaptive Features to Virtual Reality Interfaces for Ecommerce: Proc. of the 1st Intern. Conf. on Adaptive Hypermedia and Adaptive Web-based Systems (AH 2000), Trento, Italy. Berlin: Springer-Verlag, 2000. P. 86–97.
7. **Chittaro L., Ranon R., Ieronutti L.** Guiding Visitors of Web3D Worlds through Automatically Generated Tours: Proc. of the 8th Intern. Conf. on 3D Web Technology (Web3D 2003), St. Malo, France: ACM Press, 2003. P. 85–91.
8. **Hughes S., Brusilovsky P., Lewis M.** Adaptive navigation support in 3D ecommerce activities: Proc. of Workshop on Recommendation and Personalization in eCommerce at the 2nd Intern. Conf. on Adaptive Hypermedia and Adaptive Web-Based Systems (AH 2002), Malaga, Spain, 2002. P. 132–139.
9. **Celentano A., Pittarello F.** Observing and Adapting User Behavior in Navigational 3D Interfaces: Proc. of Intern. Conf. on Advanced Visual Interfaces (AVI 2004), Gallipoli, Italy: ACM Press, 2004. P. 275–282.
10. **Dos Santos C. T., Osorio F. S.** An Intelligent and Adaptive Virtual Environment and its Application in Distance Learning: Proc. of Intern. Conf. on Advanced Visual Interfaces (AVI 2004), Gallipoli, Italy: ACM Press, 2004. P. 362–365.

УДК 681.3

ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ КОНСТРУКТОРСКИХ ЧЕРТЕЖЕЙ

Аль-Шайх Хасан,

аспирант

Ю. Т. Лячек,

канд. техн. наук, доцент

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

Рассмотрены проблемы создания параметрических моделей конструкторских объектов. Изложены особенности функционирования алгоритма параметризации чертежей, который базируется на аналитико-синтетическом методе. Изложены основные задачи, решаемые в процессе реализации алгоритма на каждом этапе его работы.

Ключевые слова — параметризация, чертеж, электронное представление, опорная сеть, графические примитивы, модель, модификация.

По данным International Data Corporation и журнала Document Management, в мире в электронной форме представлено около 1,5 млрд чертежей, и их количество существенно увеличивается за счет сканирования и векторизации уже имеющих 6,5 млрд чертежей, хранящихся на бумажных носителях [1]. Кроме того, по экспертным оценкам, при модификации старых и проектировании новых изделий и механизмов 80 % узлов и деталей не претерпевают существенных изменений в конфигурации [2] по сравнению с изделиями-прототипами. В этой связи одним из важнейших функциональных средств современных конструкторских САПР является инструментарий, обеспечивающий эффективное внесение изменений в файлы описаний существующих чертежей, т. е. их редактирование и модификацию. Под редактированием понимаем возможность изменения параметров одного или нескольких однотипных графических примитивов, а под модификацией — изменение ряда различных или даже всех имеющихся примитивов, составляющих изображение или чертеж. Возможность автоматизированного редактирования и модификации чертежей наиболее эффективно решается с использованием параметрических моделей, т. е. описаний, базирующихся на совокупности варьируемых параметров. При условии существования такого описания модификация сводится к заданию нового набора параметров, а все рутинные операции по изменению отдельных примитивов и построению нового чертежа выполняются автоматически.

В настоящее время при создании параметрических моделей графических изображений ис-

пользуются два подхода — программный и интерактивный.

Первый предполагает получение описания модели в терминах процедур пакетов графического расширения, которые в виде библиотек входят в языки высокого уровня. Достоинство такого подхода заключается в том, что при создании модели и формировании на ее основе изображений с новыми размерами не требуется создавать специальные системы трансляции или интерпретации описаний, а может быть использовано общесистемное программное обеспечение. Однако для каждого класса (группы) объектов необходимо разрабатывать специальную отдельную программу. При написании таких программ используется труд квалифицированных конструкторов-программистов, и процесс этот длительный и трудоемкий. Программный подход создания параметрических графических моделей из-за своей сложности и невысокой эффективности получил широкое распространение только для параметризации относительно простых и часто используемых графических образов. Этот подход применяется для создания описаний графических объектов, которые часто используются при оформлении конструкторских документов различного назначения. Как правило, это стандартные конструкторские детали (болты, гайки, шайбы, винты и т. п.) и условные графические образы схем различного типа (электронных, электрических, топологических и др.). Таким же образом реализуются элементы оформления конструкторских документов (размерные и технологические обозначения, обозначения

швов сварных соединений, отверстия различного вида и т. п.). Однако для формирования параметрического описания конструкторских деталей произвольной формы, характерной для подавляющего большинства деталей конструкций, программный подход использовать нецелесообразно.

Второй способ — интерактивный. В этом случае параметрическая модель создается специализированной автоматизированной системой либо непосредственно в процессе формирования изображения (параллельная параметризация), либо на базе ранее созданного графического файла описания (последующая параметризация).

В первом случае процессы формирования изображения и модели едины, и создать параметрическую модель проще, так как она строится автоматизированной системой одновременно (параллельно) с прорисовкой изображения. Такой метод называют также методом внутренней параметризации, так как от конструктора для создания модели не требуется никаких дополнительных действий. Система сама фиксирует информацию о способах формирования всех графических примитивов изображения и связей между ними в своих структурах данных.

При втором варианте процессы создания изображения и соответствующей ему параметрической модели разделены во времени. При этом в графическом файле описания изображения или чертежа детали в явном виде представлены только данные о графических примитивах, составляющих изображение, и нет явной информации о способах их формирования и взаимных связях. В процессе формирования конструктором чертежа детали и установки на него размерных обозначений происходит «экономия» количества проставленных размерных обозначений на графических примитивах, которая достигается за счет повторяемости элементов, совпадения у различных примитивов точек и координат, условий параллельности, перпендикулярности и касания отдельных примитивов, за счет постоянства толщины, симметричности, условий связи основных и дополнительных видов и т. п. «Экономия» размерных обозначений приводит к тому, что большинство графических примитивов чертежа в файле его описания не имеют явной связи с имеющимися на чертеже размерами. Они не могут быть непосредственно изменены в соответствии с изменением значений размерных обозначений, т. е. непосредственная параметрическая связь отсутствует. Поэтому для параметризации такого электронного описания чертежа требуется доопределять его тем или иным образом. Например, при использовании метода параметризации с доопределением параметров приходится

устанавливать дополнительные размеры на ряд графических примитивов чертежа.

Достоинством метода параллельной параметризации является высокая степень автоматизации формирования модели, основным недостатком — невозможность применять его для параметризации созданных изображений (чертежей), которые представляются в общепринятых электронных форматах описания (GKS, DXF, IGES и т. п.). В этих случаях можно использовать системы, основанные на методе доопределения размерной сети (метод последующей параметризации).

Метод доопределения описаний чертежей путем внесения в них дополнительных размерных обозначений, который широко использовался еще совсем недавно, достаточно прост в реализации. Однако его главный недостаток заключается в относительно большом количестве требуемых дополнительных размеров, что существенно усложняет работу конструктора для получения параметрических описаний.

В связи с ограничениями метода доопределения предлагается использовать метод аналитико-синтетического формирования параметрической модели чертежа [3] (так называемый МАС-параметризации), который можно отнести к полностью автоматическим методам последующей параметризации. Метод не требует прорисовки дополнительных размеров и не предполагает фиксации способа формирования каждого графического примитива при первоначальном создании чертежа, а базируется на анализе имеющегося электронного файла описания чертежа. Метод основывается на том, что:

- совокупность всех размерных обозначений, проставленных в чертеже, полностью определяет конфигурацию изображенного на нем объекта и позволяет по этому чертежу изготовить деталь строго определенной формы, так как чертеж является графическим параметрическим описанием изображенной на нем детали или сборочной конструкции;

- в файле описания чертежа содержится вся информация, необходимая для автоматического построения его твердой копии (прорисовки документа типа чертеж);

- путем анализа всех примитивов изображения и их взаимного расположения можно установить параметры каждого графического примитива в зависимости от используемых в этом чертеже размерных обозначений и их конкретных значений, т. е. получить их параметрическое описание, которое способно воспринять и обработать ЭВМ. Эта возможность базируется на том, что чертеж сам является графическим параметрическим описанием, понятным человеку, но в исходном виде не воспринимаемым ЭВМ.

Таким образом, метод аналитико-синтетической параметризации обеспечивает автоматическое преобразование одной формы параметрического представления (графического, воспринимаемого человеком) в форму представления, которую понимает ЭВМ. Следует отметить, что если описание файла чертежа не отвечает отмеченным условиям и по такому чертежу невозможно изготовить конкретную деталь, то такой чертеж следует считать незавершенным, и процесс его параметризации теряет смысл.

Для решения общей задачи МАС-параметризации чертежа на основе файла его графического описания должен быть проведен анализ этого описания и осуществлено:

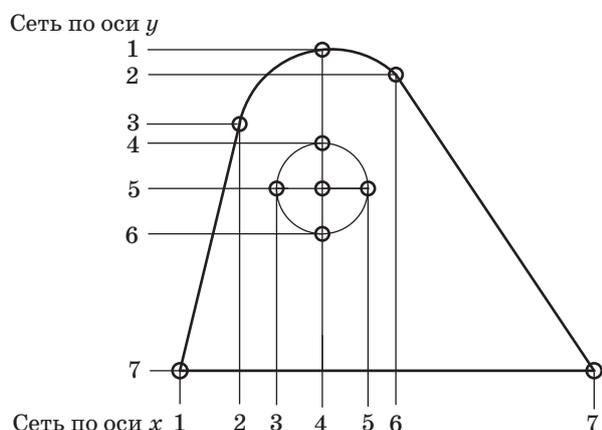
- разделение (сортировка) всех графических примитивов, составляющих полное описание чертежа:

- на основные (отрезки, дуги, окружности, полилинии и т. п.), из которых непосредственно формируется образ детали, представленной на чертеже;

- вспомогательные, к которым следует отнести оси различного вида (отрезки, дуги и окружности) и размерные обозначения;

- макросы или ассоциативные элементы, к которым относятся в первую очередь размерные обозначения разного вида, всевозможные технологические обозначения, сортируемые по типам, тексты примечаний, форматы с основными и дополнительными надписями;

- создание опорной сети чертежа (рис. 1). Под этим понятием подразумевается нерегулярная прямоугольная координатная сеть, узлы которой определяются положением всех характерных точек всех основных графических примитивов, составляющих чертеж (точек начала, конца, излома отрезков и полилиний, центров и квадрантных точек дуг и окружностей, точек касания, привязки и т. д.). Таким образом устанавливает-



■ Рис. 1. Нерегулярные опорные сети чертежа по координатам x и y

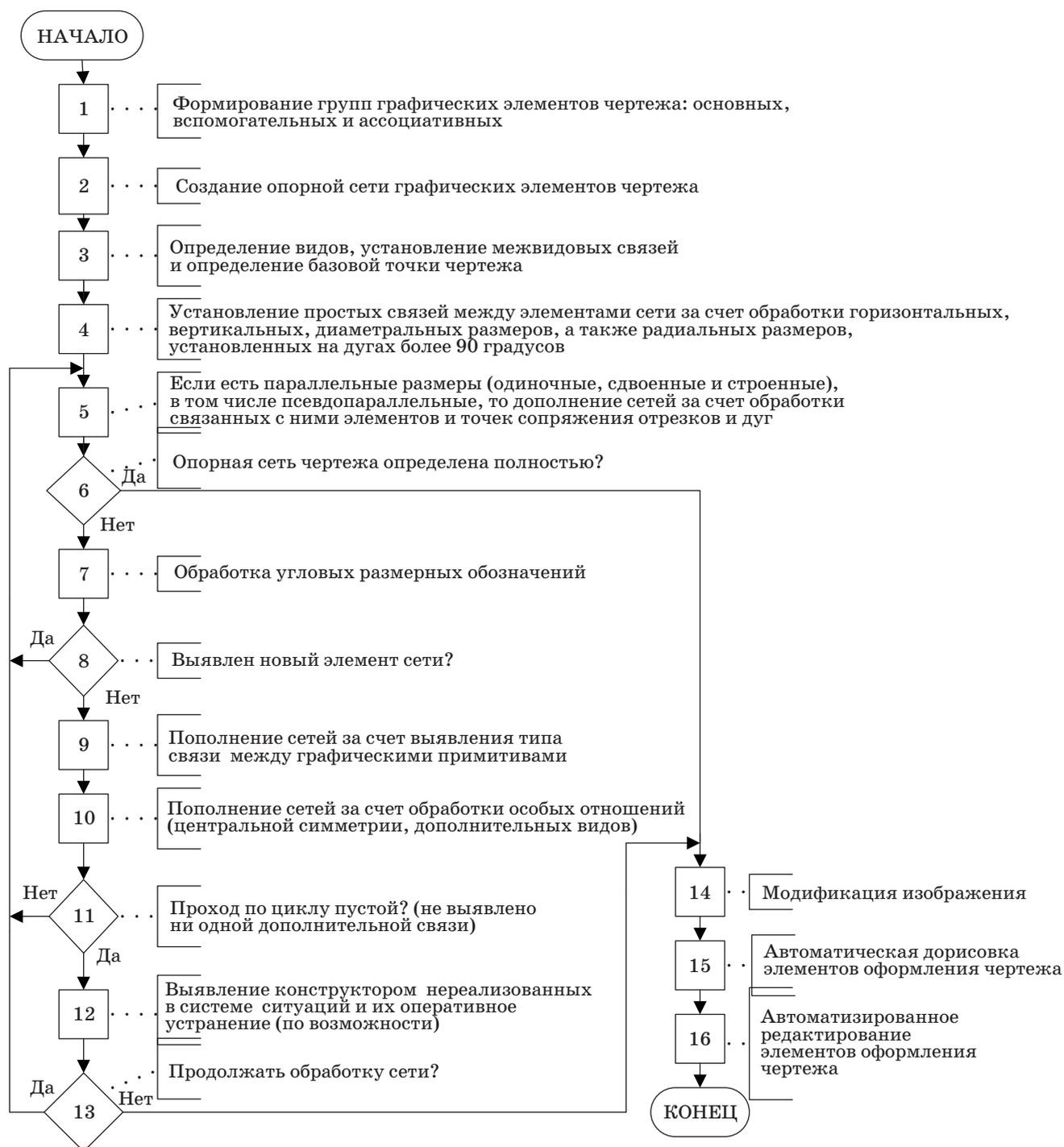
ся однозначная связь каждой характерной точки примитивов изображения с элементами сети (горизонтальной и вертикальной). При этом для каждого элемента сети можно определить хотя бы один узел, которому можно сопоставить характерную точку одного или нескольких графических примитивов изображения;

- создание угловой сети чертежа, приведенной к первому квадранту. Под этой сетью понимается информация о наклонах всех графических примитивов чертежа, для которого формируется параметрическая модель;

- установление количественных отношений связи между элементами всех созданных сетей через размерные параметры, установленные на чертеже. Эта часть составляет ядро МАС-параметризации, так как, по сути, в результате этого процесса непосредственно создается параметрическая модель анализируемого чертежа. То есть параметрическая модель чертежа есть не что иное, как установленные количественные соотношения между всеми элементами каждой из опорных сетей — горизонтальной, вертикальной и угловой — через размерные обозначения, поставленные на чертеже, и постоянные коэффициенты, определяемые требованиями ЕСКД на оформление.

Общий алгоритм МАС-параметризации, разработанный и реализованный авторами (рис. 2), может быть условно разделен на три этапа.

На первом, подготовительном этапе (блоки 1–5) осуществляются чтение файла описания чертежа, задание новых значений размерных параметров, анализ графических элементов, входящих в чертеж, разделение их на отдельные группы, исходя из их типов, с одновременным созданием опорных сетей (прямоугольных по осям x и y и угловой). Параллельно с анализом геометрических параметров графических элементов чертежа формируются данные по прямоугольникам, охватывающим области, соответствующие отдельным видам детали, изображенным на чертеже. На основе параметров охватывающих прямоугольников определяются количество и тип видов, имеющих на чертеже, и устанавливаются количественные параметры связей между всеми выявленными видами. Одновременно определяется базовая точка чертежа, от значений координат которой будут рассчитываться связи между всеми элементами прямоугольных опорных сетей. За базовую точку принимается та, которая связана с главным видом и является либо точкой центральной симметрии этого вида, либо лежит на оси его симметрии, либо с ней связано наибольшее количество линейных размеров, параллельных осям координат. Другие элементы сети считаются определенными, если они непосред-



■ Рис. 2. Общий алгоритм параметризации и модификации чертежей

ственно или опосредованно связаны с базовой точкой через значения размерных обозначений, установленных на чертеже. После определения связей между всеми элементами сетей параметрическая модель чертежа будет полностью определена, и его можно модифицировать (перерисовывать) в соответствии с новыми значениями размерных обозначений. При этом базовая точка

в процессе модификации чертежа преобразованиям не подвергается (ее исходные координаты не меняются).

Затем на первом этапе осуществляется фиксация простых связей, т. е. определение связей между теми элементами ортогональных сетей, с которыми непосредственно связаны горизонтальные, вертикальные, диаметральные и ради-

альные размерные обозначения. Одновременно обрабатываются и те элементы сетей, которые определяются дугами и окружностями с такими же радиусами и диаметрами, но расположенными в других местах чертежа, несмотря на то, что на них не установлены размерные обозначения.

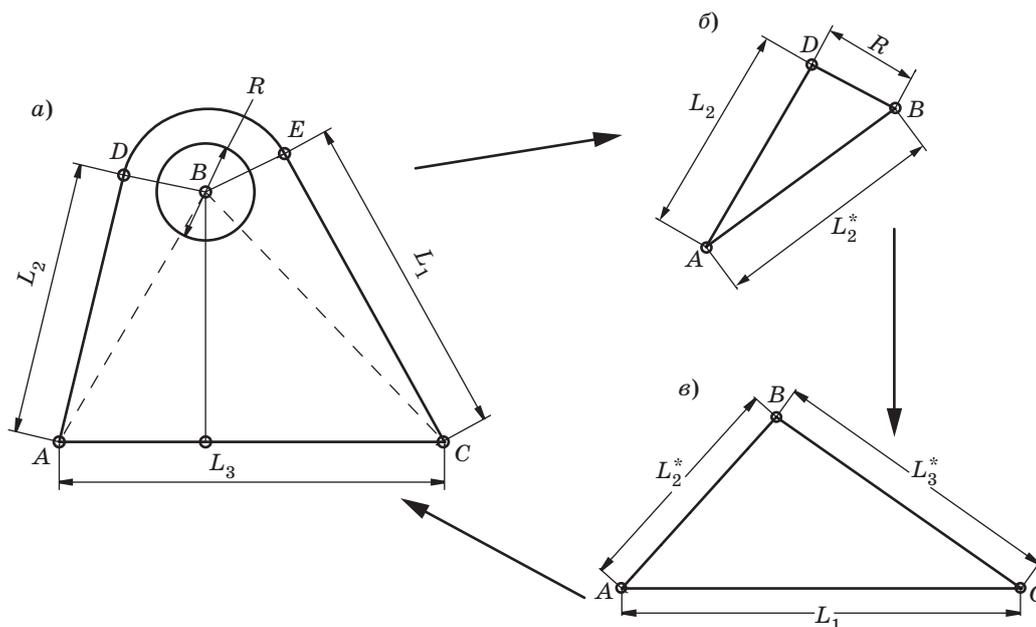
Следует отметить, что в процессе работы всего алгоритма параметризации при определении значения связи между любыми элементами сети, связанными с любым из видов чертежа, эта связь автоматически переносится на сопряженные виды (например, с вида сбоку на виды снизу и сверху и наоборот).

Как правило, после первого этапа в основной сети остается ряд неопределенных элементов. Это обусловлено тем, что при создании чертежа часть примитивов формируется с учетом параллельных и угловых размерных обозначений, которые непосредственно не определяют связи между элементами ортогональных сетей. Кроме того, при построении чертежей часто используются различные условия отношений, каждое из которых приводит к уменьшению общего количества размеров, необходимых для однозначного задания формы изображаемой фигуры. К таким отношениям между графическими элементами относятся, как известно, касания, симметрии различного типа, перпендикулярности, постоянства толщины или расстояния, а также отношения между основной частью изображения и выноской, отношения типа фаска, развертка и т. д. Поэтому,

если после первого этапа опорная сеть оказывается не до конца определенной, ее необходимо доопределить на следующих этапах.

На втором этапе (блоки 6–13) определение связей между элементами сетей должно выполняться в циклическом режиме. Это обусловлено тем, что порядок определения параметров сетей сильно зависит от структуры изображения и используемых в нем размерных обозначений. Поэтому определение некоторых элементов сетей может быть выполнено только после предварительного определения других.

Начало второго этапа определения элементов ортогональных сетей связано с обработкой параллельных и псевдопараллельных (одиночных, двоянных и строенных) размерных обозначений. При этом под псевдопараллельным размерным обозначением понимается размер, который временно автоматически вводится системой МАС-параметризации вместо обычного параллельного размера [например, вместо L_2 и L_3 (рис. 3, а) вводятся соответственно L_2^* и L_3^* (рис. 3, б, в)]. Это делается тогда, когда параллельный размер установлен на отрезке, у которого один или оба его конца связаны условием сопряжения с дугой (дугами). При этом исходный параллельный размер (см. рис. 3, б) автоматически заменяется на псевдопараллельный, величина которого определяется величинами исходного размера и радиуса дуги (радиусами дуг) сопряжения. Таким образом, псевдопараллельный размер устанавливает связь между центрами дуг сопряжения или между цен-



■ Рис. 3. Использование псевдопараллельных размеров для выявления связей между точками А, В, С, D и E: а — исходный чертеж детали с двумя параллельными размерами L_1 и L_2 ; б — пример введения вместо размера L_2 псевдопараллельного размера L_2^* ; в — замена обоих параллельных размеров L_1 и L_2 на псевдопараллельные

тром дуги, если она одна, и свободным концом отрезка. Такая замена существенно упрощает определение связей, так как позволяет вначале установить связи для элементов сети, определяемые центром дуги (дуг) — точкой *B* и точками *A* и *C* (см. рис. 3, *в*), а только затем определяются связи между этими элементами и элементами, определяемыми точкой (точками) сопряжения дуги (дуг) и отрезка (см. рис. 3, *а*) — точками *B*, *D* и *B*, *E*.

В дальнейшем приходит доопределение ортогональных сетей и определение элементов угловой сети за счет обработки угловых размерных обозначений. Угловые размеры связаны сразу с двумя сетями — горизонтальной и вертикальной, и при их обработке необходимо учитывать значения ранее установленных связей в одной из этих сетей.

В случае если опорные сети после выполненных операций все еще определены не полностью, то для каждого неопределенного элемента сети выявляются примитивы изображения, которые связаны с этим элементом. При этом реализуется следующая последовательность операций:

- определяются графические примитивы, к которым относится эта особая точка;
- выявляется вид отношения этих примитивов друг к другу в данной точке (сопряжение, пересечение, перпендикулярность и т. д.);
- на основании соотношений, соответствующих выявленному виду связи, определяются количественные значения параметров связи для соответствующих элементов опорной сети с ранее определенными элементами сети. Например, так рассчитывается связь координат точки сопряжения отрезка и дуги с центром дуги на основании определенных параметров свободного конца отрезка и параметров центра и радиуса дуги.

При наличии неопределенных элементов после выполнения второго этапа переходят либо к началу второго, либо к третьему этапу. Возврат к началу второго этапа осуществляется, если в ходе его выполнения системой был определен хотя бы один новый элемент сети или выявлена не реализованная в алгоритме ситуация, и конструктор ввел новые данные (например, дополнительное размерное обозначение) для разрешения этой ситуации.

Второй этап завершается либо полным определением сетей чертежа (завершением полного построения параметрической модели), либо выходом из неразрешимой ситуации в случае невозможности выявления за весь цикл ни одного нового элемента в любой сети.

На третьем, завершающем этапе (блоки 14–16) осуществляется перерисовка образа детали в сети, перестроенной в соответствии с набором новых

значений размерных обозначений. После этой перерисовки образа детали идет обработка элементов оформления чертежа (осей симметрии, размерных и технологических обозначений и других макросов).

Положение осей симметрии определяется соответствующими им элементами опорных сетей, которые уже определены в процессе формирования параметрической модели. Поэтому для их прорисовки необходимо только определить значения координат начала и конца всех осей после модификации основного изображения. Эти значения могут быть найдены, исходя из нового положения графических примитивов основного изображения, за которые оси выступают на величины, соответствующие требованиям ЕСКД. При этом в качестве выступающих за контур изображения значений могут быть взяты значения из исходного описания чертежа.

Процесс обработки каждого макроса складывается из двух этапов. Первый связан с определением новой точки привязки и угла наклона. Эти параметры соответствуют исходным условиям привязки макроса к элементам основного изображения и меняются в соответствии с параметрической моделью основного изображения. Второй этап определяется возможностью изменить в ряде случаев содержательную информацию макросов при модификации чертежа. Обычно из-за изменения внутренних параметров макросов их автоматическая обработка в современных подсистемах не предусматривается, т. е. они вообще не включаются в параметрическую модель и не модифицируются, а проставляются конструктором заново. Однако, с нашей точки зрения, при наличии в системе средств идентификации макросов и определения параметров их геометрической связи с основным изображением более целесообразно реализовывать автоматическое определение нового положения макроса на чертеже совместно с оперативным редактированием его содержания.

Параметризация (установление связей между всеми элементами сетей) по представленному алгоритму может быть реализована в функциональном или численном виде. При первом созданный модель необходимо сохранять в отдельном файле, и тогда ее можно использовать многократно для получения модифицированных чертежей. При втором варианте модель формируется каждый раз для конкретного набора значений размеров, вводимых пользователем перед модификацией (анализ файла чертежа приходится осуществлять каждый раз заново).

На кафедре САПР СПбГЭТУ «ЛЭТИ» реализован алгоритм в численном варианте на базе системы AutoCAD. Выбор этой системы определялся развитыми программными средствами языка

AutoLisp [4] по работе с графическими объектами и связью этой системы с другими конструкторскими системами на основе графических файлов

обмена различного типа. Построенная подсистема ускоряет работу конструктора по модификации чертежей в десятки раз.

Литература

1. Макачев А. Сканеры для САПР и ГИС // Электронный офис (газета для специалистов по автоматизации управления). Декабрь 1996. С. 10–11. <http://www.vest.msk.ru/eo>
2. Шпур Г., Краузе Ф.-А. Автоматизация проектирования в машиностроении. — М.: Машиностроение, 1988. — 648 с.

3. Лячек Ю. Т., Нахимовский Я. А., Павлов С. Н. Аналитико-синтетический метод формирования параметрических моделей конструкторских чертежей // Тр. 5-й Междунар. конф. «Графикон-95», Санкт-Петербург, 3–7 июля 1995 г. / Гос. ин-т пов. квал. Минатома РФ. СПб., 1995. Т. 1. С. 71–78.
4. Полищук Н. Н. Visual Lisp и секреты адаптации AutoCAD. — СПб.: БХВ-Петербург, 2001. — 576 с.

УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

При подготовке рукописей статей редакция просит Вас руководствоваться следующими рекомендациями.

Объем статьи (текст, таблицы, иллюстрации и библиография) не должен превышать эквивалента в 16 страниц, напечатанных на бумаге формата А4 на одной стороне через 1,5 интервала в Word шрифтом Times New Roman размером 13.

Обязательными элементами оформления статьи являются: индекс УДК, инициалы и фамилия автора (авторов), ученая степень, звание, полное название организации; заглавие, аннотация (5–7 строк) и ключевые слова на русском и английском языках, подписанные подписями.

Формулы набирайте в Word, при необходимости можно использовать формульный редактор; для набора одной формулы не используйте два редактора; при наборе формул в формульном редакторе знаки препинания, ограничивающие формулу, набирайте вместе с формулой; для установки размера шрифта никогда не пользуйтесь вкладкой Other..., используйте вкладку Define; в формулах не отделяйте пробелами знаки: + = -.

При наборе символов в тексте помните, что символы, обозначаемые латинскими буквами, набираются светлым курсивом, русскими и греческими — светлым прямым, векторы и матрицы — прямым полужирным шрифтом.

Иллюстрации в текст не заверстываются и предоставляются отдельными исходными файлами, поддающимися редактированию:

- рисунки, графики, диаграммы, блок-схемы изготавливаются в векторных программах: Visio 4, 5, 2002–2003 (*.vsd); Coreldraw (*.cdr); Excel; Word; AdobeIllustrator; AutoCad (*.dxf); Компас; Matlab (экспорт в формат *.ai);
- фото и растровые — в формате *.tif, *.png с максимальным разрешением (не менее 300 pixels/inch).

В редакцию предоставляются:

- сведения об авторе (фамилия, имя, отчество, место работы, должность, ученое звание, учебное заведение и год его окончания, ученая степень и год защиты диссертации, область научных интересов, количество научных публикаций, домашний и служебный адреса и телефоны, факс, e-mail), фото авторов: анфас, в темной одежде на белом фоне, должны быть видны плечи и грудь, высокая степень четкости изображения без теней и отблесков на лице, фото можно представить в электронном виде в формате *.tif, *.png с максимальным разрешением — не менее 300 pixels/inch при минимальном размере фото 40 × 55 мм;
- экспертное заключение.

Список литературы составляется по порядку ссылок в тексте и оформляется следующим образом:

- для книг и сборников — фамилия и инициалы авторов, полное название книги (сборника), город, издательство, год, общее количество страниц;
- для журнальных статей — фамилия и инициалы авторов, полное название статьи, название журнала, год издания, номер журнала, номера страниц;
- ссылки на иностранную литературу следует давать на языке оригинала без сокращений;
- при использовании web-материалов указывайте адрес сайта и дату обращения.

Более подробную информацию см. на сайте: www.i-us.ru

УДК 002.53:004.65

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ МОДЕЛИ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ТРАНЗАКЦИОННЫХ СЕРВЕРОВ

Ж. Ндикумагенге,¹

аспирант

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

Рассматривается проблема разработки вычислительных моделей для транзакционных серверов данных, основанных на транзакционной концепции, для решения задачи безопасного хранения данных в случае параллельного доступа к данным и отказов.

Ключевые слова — база данных, вычислительная модель, параллельный процесс, распределенная система, транзакция, сервер данных.

Введение

Управление транзакциями играет ключевую роль в информационных системах и, в частности, в системах распределенных баз данных (БД). Первоначально транзакционная концепция развивалась в контексте систем управления БД как парадигма обеспечения параллельного доступа к разделенным БД и устранения отказов. Анализ оперативной обработки транзакций в реальном времени в таких предметных областях, как обмен банковских средств, туристический бизнес показывает, что применение транзакционной концепции может включать современный бизнес-процесс, который имеет дело с распределенными системами потенциально крупных масштабов, с межоперационными компонентами и транзакционными серверами данных. Трехуровневая архитектура распределенной системы позволяет отделить транзакционные серверы данных от прикладных программ (приложений), посылающих запросы для инициализации транзакций. Под такой архитектурой ответственность за соблюдение АСИД-свойств (Атомарность, Согласованность, Изоляция и Долговечность) лежит на транзакционных серверах данных [1]. АСИД-контракт между прикладной программой и транзакционными серверами данных требует, чтобы про-

грамма динамически разграничила транзакции, а также получила желательный результат и успешное или неуспешное завершение транзакций. Менеджер запросов приложения может инициировать большое число транзакций [1]. При такой ситуации положение транзакции может находиться под угрозой при запуске большого числа конкурирующих транзакций, вызывая состояние, которое приводит к блокировке к отказу в выполнении (Lock Thrashing) [2]. Теория и алгоритмы параллельного выполнения транзакций для транзакционных серверов данных, базирующиеся на модели страницы (модель читатель/писатель) и модели объекта, позволяют адекватно и эффективно решить задачи управления параллельных процессов распределенной системы.

Постановка задачи

Архитектура системы БД имеет 6 уровней. Языковой и интерфейсный уровень образуют интерфейсы прикладных разработчиков и прикладного программного интерфейса (SQL), уровень запросов и оптимизации, отвечающий за детальное разбиение запросов на элементарные операции (действия) и применяющий решения об оптимизации их выполнения за счет, в частности, применения к ним механизма многопоточной обработки. Уровень выполнения запросов отвечает за выбор и подготовку методов и алгоритмов (выборка, сортировка, слияние и т. д.), необходимых уровню оптимизации запросов. Уровень доступа следит за управлением индексирования, доступностью и манипуляцией сохраняемых данных,

¹ Научный руководитель — кандидат технических наук, доцент, заместитель заведующего кафедрой автоматизированных систем обработки информации и управления Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» В. В. Цехановский.

а организация сохраняемых данных на страничных дисках лежит на уровне сохранения. Он отвечает также за операции ввода/вывода с диска и кэширование памяти (рисунок).

Данные в системах БД сохраняются в виде записи строкового типа последовательных байтов и состоят из полей или столбцов. Записи сохраняются на дисках в виде страниц размером 16 КБ. Страница — минимальная единица данных, переводимая между диском и оперативной памятью — служит единицами кэширования в памяти. Диск может читать или писать одну или много страниц (блок) только один раз. Доступ к данным осуществляется сканированием записей данных по специфицированному ключу выбора. Существует много разработанных целым поколением исследователей структур данных (дерево поиска, хеш-таблицы, В+ дерева и т. п.), облегчающих осуществление таких типов операций. Трехуровневая архитектура системы распределенных БД позволяет выполнять параллельные транзакции и маскирует параллельности и возможные отказы от разработки приложений (или прикладных программ). Данная возможность обусловлена абстрактной концепцией, названной транзакцией, служащей интерфейсным контрактом между прикладной программой и транзакционными серверами данных. Прикладная программа специфицирует границы транзакций, указывает начало и конец вызова при выполнении транзакций. Транзакционные серверы данных обеспечивают соблюдение АСИД-свойства запускаемых транзакций [1]. Однако транзакционные серверы данных должны иметь компоненты данных, обеспечивающие параллельную обработку и восстановление и обладающие высокой производительностью, а также для выполнения большого числа транзакций выдавать выходные результаты за очень короткое время. Приложения для обработки транзакций

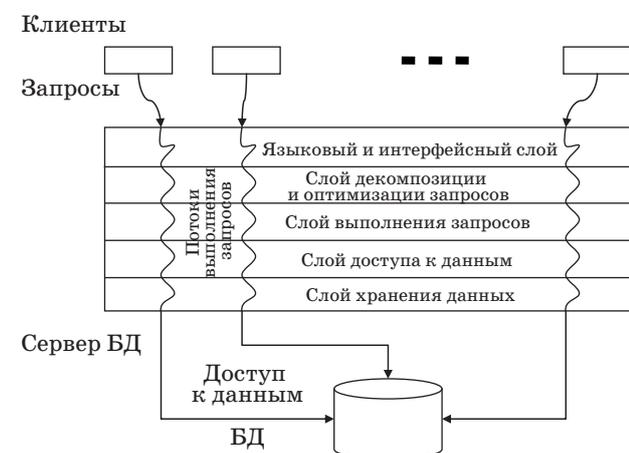
(транзакционные серверы данных) относятся к классу критических для бизнеса или иной деятельности. Транзакционное приложение занимается обновлением информации в БД. Нагрузка на такое приложение обычно предсказуема, значительную долю в ней занимают запросы на обновление. Для управления процессами используются мониторы транзакций. Они координируют поток информации между различными клиентами, иницилирующими запросы, и приложением обработки транзакций, которое отвечает на эти запросы [3].

Модель страницы

Вычислительные модели для транзакционных серверов данных реализуются разными способами в зависимости от выбранного уровня абстракции, от среды программирования или используемого приложения. Принцип разделения (применения) моделей обусловлен методологией, позволяющей отражать главные и значимые компоненты [1]. Единый подход, в котором вычислительные модели будут использоваться, характеризуется следующей стратегией:

- 1) определение элементарных операций на объекты, являющихся неделимыми, атомарными и изолированными от других операций;
- 2) определение (формирование) последовательности элементарных операций или частичный порядок элементарных операций в совокупность операций, обеспечивающих АСИД-свойства;
- 3) образование расписаний транзакций, как абстрактное понятие параллельного выполнения набора частичного порядка элементарных операций, за счет формирования ряда познаваемых индивидуальных транзакций;
- 4) выбор из синтаксических корректных расписаний тех, которые удовлетворяют АСИД-свойствам;
- 5) разработка протоколов или алгоритмов создания корректных расписаний, которые по вызовам прикладных программ запускают и выполняют операции динамически.

Эти шаги значимы для любой виртуальной транзакционной модели, разработка которой идет от базовых (атомарных) операций к протоколам. Модель страницы обеспечивает эффективный доступ к страницам данных и отображает все операции высшего уровня в операции чтения и записи на страницах. Каждая операция чтения или записи предполагает неделимую операцию независимо от того, имеет ли это место в кэш-памяти или на диске. Операции на странице представляют собой строгую форму абстракции. Модель страницы определяет синтаксические корректные транзакции. Формально сервер дан-



■ Слойная архитектура системы БД

ных содержит конечное множество $D = \{x, y, z, \dots\}$ неделимых и идентифицируемых элементов с неделимыми операциями чтения и записи. Отношение полного порядка определяется моделью страницы транзакции в виде конечной последовательности шагов (действий) типа $r(x)$ или $w(x)$:

$$t = p_1 p_2 \dots p_n,$$

где $n < \infty$; $p_i \in \{r(x), w(x)\}$, $1 \leq i \leq n$; $x \in D$, x — элемент (с индексом и без него) из D ; r — операция чтения, а w — операция записи. Простая транзакция имеет вид

$p_j = r(x)$ — шаг j читает элемент данных x ;

$p_j = w(x)$ — шаг j пишет элемент данных x .

Такая формализация определяет некую семантику для отдельной транзакции, такой, что две разные транзакции имеют разные шаги, но возможные одни и те же типы шагов [1].

Семантическая интерпретация транзакции на уровне модели страницы базируется на $r(x)$ и $w(x)$ операции.

Если $p_j = r(x)$, то j -й шаг данной транзакции является операцией чтения, элемент x получает текущее значение v_j :

$$v_j = x.$$

Если $p_j = w(x)$, то j -й шаг данной транзакции является записью, текущее значение элемента x зависит от сочетания значений v_j , прочитанных до шага j :

$$x = f_j(v_{j_1}, v_{j_2}, \dots, v_{j_k}),$$

x — возвращаемое значение такое, что $\{v_{j_1}, v_{j_2}, \dots, v_{j_k}\} = \{j_r | p_{j_r} \text{ шаг чтения и } j_r < j\}$.

Все значения v_j , $1 \leq i \leq k$, считанные до j -го шага транзакции t , используются как параметры в функцию f_j .

Формально модель страницы — транзакция — есть пара $t = (\Omega, \rho)$, где Ω — конечное множество шагов вида $r(x)$ или $w(x)$, $x \in D$ и $\rho \subseteq \Omega \times \Omega$ есть отношение частичного порядка на множестве Ω такое, что если $\{p, q\} \subseteq \Omega$, где p и q имеют доступ к одному и тому же элементу данных и хотя бы одна из этих двух операций является операцией записи, то $p \rho q \vee q \rho p$.

В данной модели любые пары операций, одна из которых операция записи, должны быть упорядочены. В каждой транзакции каждый элемент данных может быть прочитан или записан максимум один раз и чтение элемента данных невозможно после записи.

Модель объекта

Модель объекта дает возможность представления вызовов любых методов доступных объектов

в виде абстрактных типов данных. Реализация объекта и его операции требуют запроса некоторых типов объектов нижнего уровня. Графическое представление транзакций имеет древовидную структуру с их вызываемыми операциями в качестве вершин [1]. Конечные вершины дерева транзакций являются элементарной операцией в смысле модели страницы.

Это необходимо, чтобы обеспечить модульность структуры деревьев, отражение всех соответствующих аспектов операционного выполнения, строгость рассуждений о параллелизме между транзакциями.

Дерево транзакции строится так, чтобы его «листья» (конечные вершины) были элементарными операциями чтения и записи на страницах. Транзакция t — конечное дерево помеченных вершин.

Формализация модели объекта транзакции проводится следующим образом:

- идентификацией транзакции как метки корневого узла (вершины) дерева;
- именами и параметрами вызываемых операций как метки внутренних вершин;
- моделью страницы как метки конечных вершин (листьев);
- отношением частичного порядка « ρ » на множестве Ω конечных вершин таким, что для всех конечных вершин операции p и q , где p имеет вид $w(x)$ и q имеет вид $r(x)$ или $w(x)$ или наоборот, мы имеем $p \rho q \vee q \rho p$.

Для изучения и исследования множественных транзакций, выполняемых параллельно, постановка задачи должна формироваться объединением вовлеченных операционных деревьев транзакций в «лес» вложенных транзакций (могут быть распределенные и/или параллельные транзакции). При этом необходим просмотр частичного порядка выполнения операций конечных вершин и неявно полученного частичного порядка выполнения относительно высокоуровневых операций. Частичный порядок выполнения операций определяется объединением конечных вершин всех вызванных деревьев. Из слияния структур всех деревьев можно получить одно дерево транзакций, на основе которого лучше изучается внутреннее упорядочение вершин операций исходных деревьев, получившихся из частичного порядка выполнения операций конечных вершин. Этот подход позволит нам исследовать не только «следы» операций на уровне конечных вершин, но также параллелизм или последовательные упорядочения в среде операций высокого уровня. Суждение параллелизма на различных древесных уровнях действительно необходимо для эксплуатации объектной модели ради оптимизации производительности [1]. Вложен-

ные транзакции (распределенные и/или параллельные) важны для распределенных систем, потому что они представляют естественный способ распределения транзакций по нескольким компьютерам и превращают работу исходной транзакции в логическую форму [4].

Заключение

Транзакции играют важную роль в управлении вычислительными процессами распределенной системы БД, являясь связующим звеном между прикладной программой и рядом транзакционных серверов данных, обеспечивая объединение множества запросов на эти серверы в логические единицы. Транзакционная концепция об-

легчает работу разработчиков прикладных программ и снижает стоимость обслуживания. Высокий параллелизм, большая пропускная способность и быстрота восстановления от отказов являются важными функциональными требованиями для современных распределенных информационных систем. Модели страницы и объекта являются не только теоретическим обоснованием данной проблематики, но и прикладным средством управления современных информационных систем. Абстрактное основание данных моделей может использоваться для получения конкретных алгоритмов параллельной обработки конкурентных транзакций и фактически жизнеспособных, ориентированных системных решений.

Литература

1. Weikum G., Vossen G. Transactional information systems, Theory, algorithms and practice of concurrency control and recovery. — San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 2002. 853 p.
2. Philip A. B., Newcomer E. Principles of Transactions processing for the systems professional. — San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 1997. 357 p.
3. Гома Х. Проектирование систем реального времени, параллельных и распределенных приложений. — М.: ДМК Пресс, 2002. — 704 с.
4. Таненбаум Э., ван Стен М. Распределенные системы. Принцип и парадигмы. — СПб.: Питер, 2003. — 789 с.

УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

С сентября 2009 г. основные элементы статей, размещенные на платформе РУНЭБ, индексируются в крупнейшей поисковой системе Интернета Google.

На сайте РУНЭБ (<http://www.elibrary.ru>) доступна новая услуга — «обсуждение статьи». Авторы и читатели теперь могут вступить в диалог и ответить на вопросы и комментарии друг друга.

УДК 681.3

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СРЕДСТВ СИНХРОНИЗАЦИИ БЛОКОВ ГЛОБАЛЬНО АСИНХРОННЫХ СИСТЕМ С ПРОИЗВОЛЬНОЙ ЛОКАЛЬНОЙ СИНХРОНИЗАЦИЕЙ

В. Б. Мараховский,

доктор техн. наук, профессор

В. Ф. Мелехин,

доктор техн. наук, профессор

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Рассматриваются подходы к организации взаимодействия блоков в многопроцессорных системах с параллельно протекающими процессами, а также методика проектирования на базе самосинхронных схем устройства (синхростратума), координирующего взаимодействие блоков в глобально асинхронной системе.

Ключевые слова — синхронизация, логическое время, физическое время, синхронные и асинхронные автоматы, массив автоматов, синхростратум, проектирование.

Введение

Синхронизация является одной из важных проблем в цифровых вычислительных системах. Специалисты в области проектирования аппаратуры и программного обеспечения понимают и решают ее по-разному на различных уровнях системной иерархии.

Термин «синхронизация» понимают как координацию событий (сигналов, операций или процессов) во времени. Координация событий отражает причинно-следственные отношения между ними и определяется частичным порядком на множестве событий, выделенных в системе. Такое определение синхронизации соответствует концепции *логического времени*, течение которого связано с наступлением того или иного события. Концепцию логического времени используют разработчики программного обеспечения.

Разработчикам системы и ее аппаратного обеспечения необходимо учитывать, что любая система функционирует в непрерывном *физическом времени*, которое может быть представлено непрерывной независимой переменной. На процессы в аппаратуре существенное влияние оказывают задержки в элементах и связях, а не только события, рассматриваемые в логическом времени. Поэтому при реализации вычислительных систем проектировщику необходимо обес-

печить соответствие следования событий в реальном физическом времени тому частичному порядку, который был заложен в логическом времени.

Группа ученых, возглавляемая профессором В. И. Варшавским (в состав группы входит и В. Б. Мараховский, один из авторов данной статьи), в 1990-е годы проводила исследования по рассматриваемой теме и получила ряд интересных результатов. В тот период исследователи работали и публиковались за рубежом, и эти результаты мало знакомы специалистам в России. Кроме того, данная группа известна по исследованиям асинхронных и, в частности, самосинхронных схем, не получивших должного развития в современных технологиях проектирования цифровой аппаратуры и недостаточно поддержанных инструментальными средствами автоматизации проектирования.

Цель статьи — рассмотреть практические задачи разработки средств координации событий в глобально асинхронных системах, подсистемы которых чаще всего являются синхронными, хотя могут быть и асинхронными, с использованием результатов, полученных специалистами в «асинхронике». А также в том, чтобы обратить внимание отечественных специалистов на публикации группы В. И. Варшавского, которые приведены в списке литературы.

Классификация вычислительных систем по способам синхронизации работы подсистем

С использованием теории автоматов любую вычислительную систему можно представить как сеть конечных автоматов. Функционирование конечного автомата как математической модели некоторого устройства описывается в шагах алгоритма, и сама модель не содержит понятия времени. С другой стороны, любое устройство функционирует в реальном физическом времени. Время вводится на этапе структурного синтеза автомата как физического устройства. Реальное физическое время квантуется, т. е. представляется в виде последовательности квантов (тактов). Такое квантованное физическое время обычно называют *дискретным временем*. На выполнение шага алгоритма автомата выделяется квант времени, или такт. Таким образом, последовательность шагов алгоритма выполняется за время прохождения соответствующего количества тактов. В зависимости от того, как непрерывное физическое время отображается на последовательность тактов в дискретном времени, автоматы как физические устройства делятся на два класса: синхронные и асинхронные.

В *синхронных автоматах* физическое непрерывное время делится на такты сигналами от генератора тактовых импульсов. Длительность такта постоянна и определяется частотой генератора (тактовой частотой). Генератор выполняет функцию часов. Для привязки события ко времени говорят о номере такта, когда произошло событие.

В *асинхронных автоматах* начало выполнения очередного шага алгоритма связано с изменением состояния входа (с событием на входе), и физическое время квантуется сигналами окончания переходных процессов в схеме автомата. Такие асинхронные автоматы называются *согласованными*, в отличие от традиционных асинхронных автоматов, в которых, как и в синхронных, применяется тактирование входных сигналов, рассчитанное на худший случай. В дальнейшем под асинхронным автоматом будем понимать только согласованный автомат. В согласованных автоматах длительность такта не является постоянной, что приводит к сложности определения реальных моментов физического времени выполнения шагов алгоритма, реализуемого автоматом.

При построении системы, содержащей много параллельно работающих блоков, возникает проблема организации требуемого взаимодействия блоков, т. е. координации их функционирования, или синхронизации. Когда говорят, что некоторые события происходят синхронно, то обычно

имеют в виду, что эти события являются следствиями одних и тех же причин. Такое понимание синхронности можно использовать как в логическом, так и в физическом времени. Когда говорят о *синхронной системе*, то обычно подразумевают, что все события в системе могут происходить в том или ином такте. События происходят синхронно, если они происходят в одном такте. Такое понимание синхронности используется специалистами по аппаратным средствам при построении синхронных систем.

С увеличением сложности вычислительных систем и ростом их быстродействия возрастает сложность синхронизации всех блоков от одного генератора (одних внешних часов). Это можно объяснить, по крайней мере, двумя причинами:

- события во внешних часах не имеют причинно-следственной связи с событиями в системе, что в результате приводит к нарушению общей причинной семантики поведения системы;

- система доставки сигналов от часов в различные точки системы из-за задержек в связях функционирует с ограниченной точностью. Она может правильно функционировать только в случае, когда ее точность соответствует требуемой точности синхронизации. Обеспечение этих требований за счет увеличения длительности такта в настоящее время существенно снижает быстродействие в сравнении с теми возможностями, которые предоставляет современная микроэлектроника.

Термин «асинхронность» тоже часто трактуется по-разному специалистами в области программного обеспечения и аппаратуры. Программисты обычно трактуют асинхронность как зависимость события от числа шагов алгоритма, необходимых для получения результатов из исходных данных. Такой подход оказывается полезным только для оценки эффективности программы. В параллельном программировании подразумевается, что шаги алгоритма могут выполняться одновременно. В этом случае при спецификации программы используются причинно-следственные отношения между операциями в виде их частичного упорядочения, что эквивалентно введению в алгоритм логического времени.

На уровне аппаратных средств течение логического времени обычно измеряется в единицах физического времени (числом тактов). Используя операцию *ждать* и хорошо известные способы и средства синхронизации (вместе с внешними часами), можно решить проблемы поведения параллельной системы во времени даже в случае, когда локальные процессы внутри системы являются асинхронными. Это используется, например, при организации обменов по системной шине в компьютере.

При отказе от общих часов мы приходим к системам, которые являются асинхронными в физическом времени. Существуют подходы к проектированию асинхронных аппаратных средств, которые не используют общих часов при координации событий. Однако все они, включая подход самосинхронизации, приводят к решениям более высокой сложности, чем синхронные средства. Они требуют специальных методов спецификации поведения аппаратуры, существенно ограничивают возможности использования развитых инструментальных средств автоматизации проектирования.

В работе [1] приведена классификация вычислительных систем по способу координации поведения блоков аппаратных средств во времени:

ПС — полностью синхронные (синхронизация от общих часов);

ПА — полностью асинхронные (например, самосинхронные);

ЛАГС — локально асинхронные, глобально синхронные;

ГАЛС — глобально асинхронные, локально синхронные;

ГАЛП — глобально асинхронные, локально произвольные.

Полностью синхронные и ЛАГС требуют системы доставки синхронизирующих сигналов от общих часов. Недостатки таких систем обсуждались выше.

Полностью асинхронные системы обладают рядом важных преимуществ, но они очень сложны и не соответствуют принятой парадигме эволюционного развития средств и методов проектирования аппаратуры, не позволяют использовать в проектах большинство из уже разработанных узлов, представленных в виде IP-модулей.

Наиболее привлекательными являются ГАЛС-системы, так как они объединяют преимущества как синхронного, так и асинхронного подходов.

Системы ГАЛП являются расширением ГАЛС-систем. В таких системах блоки структуры могут относиться как к классу синхронных (ПС), так и к классу асинхронных (ПА). При анализе их работы в физическом времени асинхронность трактуется как непредсказуемые вариации длительностей переходных процессов. В логическом времени асинхронность трактуется как вариации количества дискретных шагов в процессах. Физическое время может быть трансформировано в логическое время посредством введения общих часов или использования принципов самосинхронизации. Будем говорить о *глобальном* логическом времени, если функционирование структурных блоков системы координируется в логическом времени. *Локальное* логическое время протекает внутри блоков структуры системы.

Концепция времени и ее интерпретации при проектировании вычислительных систем

Применительно к рассматриваемым вопросам синхронизации процессов в системах необходимо уточнить, что понимается под словом «время».

Современная наука говорит, что время (как и материя) имеет двойственную природу. С одной стороны, время трактуется как число (Платон и Аристотель) или как момент, с другой стороны, — как отражение причинно-следственного отношения между событиями.

Известно высказывание Аристотеля: «Если ничего не происходит, то нет и времени». Традиция греков была продолжена Лейбницем, который трактовал время как отношение. С этой точки зрения, время определяется как частичный порядок на событиях, устанавливающий причинно-следственное отношение между ними. McGraw-Hill Encyclopedia of Science & Technology определяет синхронизацию как «процесс поддержания одной операции в шагах другой». Здесь время рассматривается как дискретная величина.

Концепция аналогового времени связана с именем Исаака Ньютона, который продолжил и развил античную индоевропейскую трактовку времени как непрерывной величины, называя ее физическим временем. Заметим, что все существующие определения физического времени в той или иной степени связаны с процедурой измерения времени, которая может быть выполнена только с определенной степенью точности. Процедура измерения обеспечивает связь между физическим и логическим временем. Основным измерительным прибором при этом являются часы; в процессе измерения они сравнивают временной интервал между двумя дискретными событиями с числом также дискретных событий, с помощью которых осуществляется измерение. Одновременность двух событий, строго говоря, может трактоваться только как логическая абстракция, достигаемая также с определенной степенью точности.¹

¹ С некоторой степенью спекуляции можно сказать, что минимальный интервал при временной дискретизации определяется выражением для неопределенности в форме времени $\tau = \hbar/\Delta E$, где τ — среднее время перехода от одного квантового состояния к другому с разницей энергетических уровней ΔE ; \hbar — постоянная Планка. Если $\Delta E = 1 \text{ eV} \approx 600 \text{ eV}$ (характеристика энергии для переключения продвинутых микроэлектронных устройств), то $\tau \approx 10^{-3} \text{ пс}$. Практически то же значение ($\tau \approx 2 \cdot 10^{-3} \text{ пс}$) дается для среднего времени переключения квантового устройства, когда испускается один фотон с $\lambda \approx 900 \text{ нм}$ (нормальная частота для оптоволокна). Эти значения можно рассматривать как приблизительную нижнюю границу для квантования времени.

Все шаги проектирования, начиная с формулирования исходной спецификации и кончая физическим проектированием, касаются в том числе и организации временного поведения проектируемых устройств. Таким образом, проектирование системы синхронизации можно интерпретировать как реализацию системного времени.

Несмотря на то что все устройства являются физическими объектами, функционирующими в реальном физическом времени, специалисты в области проектирования систем на разных этапах проектирования имеют дело с различными типами времени и по-разному трактуют системное время, так же как и связанные с ними термины синхронный и асинхронный.

Специалисты в области программирования и архитектуры имеют дело с логическим временем. Они трактуют время как число шагов в процессе с дискретными состояниями (число переходов из одного дискретного состояния в другое). Асинхронность трактуется как вариации (например, в зависимости от данных) числа шагов в процессе (алгоритме) от его инициализации до получения результата. Например, деление без восстановления остатка является синхронным процессом, в то время как деление с восстановлением остатка — асинхронным процессом.

Специалисты в области микроэлектроники и вычислительной техники имеют дело с физическими процессами, которые протекают в физических устройствах, и, следовательно, с аналоговым физическим временем. Для них асинхронность связана с неуправляемыми вариациями времени распространения сигналов по сети элементов и перехода из одного дискретного состояния в другое. Некоторые факторы таких вариаций могут быть постоянными (например, разброс технологических параметров), некоторые — переменными (такие как изменения условий функционирования: температуры, питающих напряжений и др.), а также зависящими от данных (например, время завершения переносов в сумматоре).

Проблемы синхронизации можно рассматривать как проблемы реализации интерфейса между физическим и логическим временем. Простейшим и общепринятым способом обеспечения такого интерфейса в синхронных системах является использование системных часов (общего генератора тактовых импульсов). Интервал физического времени между двумя тактовыми импульсами (длительность такта) должен быть достаточно большим, чтобы маскировать все возможные вариации длительностей переходных процессов. При этом можно полностью исключить из рассмотрения физическое время и рассматривать работу только в логическом времени. Это является

основным преимуществом синхронного подхода, использующего общие часы.

Несмотря на все преимущества, синхронный подход имеет недостатки, которые становятся все более ощутимыми по мере совершенствования технологии производства интегральных схем в направлении повышения степени интеграции и производительности. Наибольшие трудности связаны с проектированием системы доставки синхросигналов в точки их потребления.

Альтернативой синхронному подходу являются полностью асинхронные модели (им соответствуют несколько направлений в схемотехнике: самосинхронные схемы; схемы, не зависящие от скорости элементов; схемы, не чувствительные к задержкам). В них системное время определяется частичным порядком, накладываемым на дискретные события. Время вводится с помощью спецификации причинно-следственных отношений между событиями; интерфейс между физическим и логическим временем обеспечивается определенными механизмами фиксации моментов окончания переходных процессов в системных компонентах.

Рассмотрим основные *методологические различия* между синхронным и асинхронным подходами.

В синхронном подходе механизм, обеспечивающий системное время, полностью отделен от модели поведения системы. В асинхронном подходе он встроен в модель поведения системы. Его следует разрабатывать вместе с исходной поведенческой спецификацией.

Асинхронное проектирование оказывается более сложным, чем синхронное. Основная причина этого заключается в том, что поведенческие алгоритмы обычно формулируются как синхронные. Перевод синхронных алгоритмов в асинхронные является одной из сложных задач, требующей большой изобретательности.

Как правило, асинхронные реализации превосходят синхронные по сложности в 2,5–4 раза и являются по этой причине малоэффективными, хотя имеют определенные положительные свойства. Поэтому в последние 10 лет бурно развивается ГАЛС-подход к проектированию аппаратных средств. Он сочетает в себе преимущества синхронного и асинхронного подходов и свободен от многих недостатков, присущих обоим.

Любую асинхронную систему можно представить в виде композиции двух подсистем (слоев) [2–5]: синхростратума (*stratum* — слой, ярус) и процессорного стратума. Такая декомпозиция позволяет абстрагироваться от поведенческих аспектов блоков системы и сосредоточить основное внимание на проблеме их глобальной синхронизации с помощью полностью асинхронного

синхростратума. Кроме того, такой подход (с выделением синхростратума) позволяет строить глобально асинхронные системы по их синхронным прототипам. Подход применим для ГАЛС- и ГАЛП-систем.

Проектирование синхростратумов

В представлении системы в виде композиции синхростратума и процессорного стратума синхростратум функционирует как распределенные асинхронные часы, с помощью которых осуществляется глобальная синхронизация блоков системы. Он может быть построен по аналогии с системой синхронизации от общих часов.

Отсутствие внешних часов требует асинхронного взаимодействия синхростратума с блоками системы. Это может быть организовано за счет использования запрос-ответного взаимодействия (хендшейка), которое требует от блоков процессорного стратума формирования сигналов о завершении в них переходных процессов. Такая задача может быть решена многими способами, зависящими от типа и структуры блока, его размеров, возможных вариаций длительностей переходных процессов и т. д. Например, сигнал завершения переходного процесса может быть сформирован с помощью задержки, включенной параллельно блоку, использованием самосинхронных блоков, уже имеющих такой сигнал, или применением старт-стопного генератора, запускаемого сигналом *запрос* и останавливаемого по переполнению счетчика числа тактов. При организации сложных систем возможно также использование синхростратумов второго и более высокого уровней иерархии.

В дальнейшем изложении структура и функции блоков процессорного стратума системы не рассматриваются. Взаимодействие блоков с синхростратумом рассматривается на уровне сигналов инициации и завершения переходных процессов. Основное внимание будет уделено способам трансформации системы синхронизации синхронного прототипа в спецификацию синхростратума, с помощью которого должна осуществляться глобальная синхронизация системных блоков.

Синхронный прототип

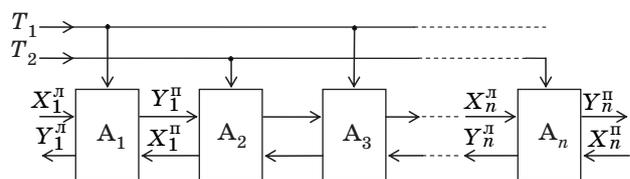
Основная идея синхронизации посредством тактовых импульсов T от внешних часов (генератора синхроимпульсов) связана с организацией взаимодействия блоков по принципу «ведущий—ведомый».

Для реализации памяти синхронных автоматов используются триггеры, синхронизируемые фронтом (либо спадом) синхроимпульса [6]. В них

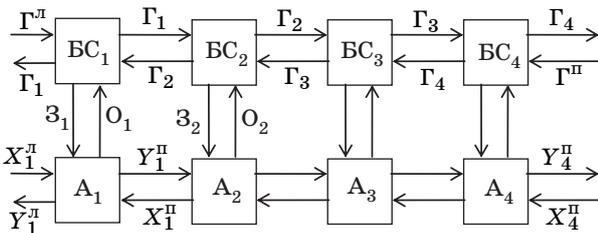
встроен механизм «ведущий—ведомый». В одном синхронном триггере используются два асинхронных триггера: основной и вспомогательный. При одном значении сигнала T , соответствующем первой фазе работы синхронного триггера, происходит запись нового состояния в основной триггер, состояние вспомогательного при этом не изменяется и соответствует старому значению состояния автомата. При другом значении сигнала T (смене значения T и соответствует фронт либо спад) новое состояние из основного триггера копируется во вспомогательный. В этой фазе состояние основного триггера не меняется, несмотря на изменения внешних сигналов. Такая организация памяти позволяет исключать критические состязания в автомате, связанные с разбросом задержек срабатывания отдельных триггеров.

Рассмотрим в качестве синхронного прототипа одномерный массив линейно связанных синхронных автоматов. Массивы автоматов синхронизируют с помощью различных систем синхронизации в зависимости от способов передачи сигналов между автоматами и логического базиса реализации автоматов. В простейшем случае используется однопроводная синхронизация. При этом механизм реализации двухфазной работы, соответствующей принципу «ведущий—ведомый», встроен в каждый синхронный триггер, как уже было отмечено. Поскольку наша задача — рассматривать организацию синхростратума, также координирующего взаимодействие автоматов по принципу «ведущий—ведомый», то будем рассматривать в качестве синхронного прототипа массив синхронных автоматов с двухпроводной двухфазной синхронизацией (рис. 1).

В нем механизм «ведущий—ведомый» вынесен в двухпроводную систему синхронизации, что удобно для дальнейшего рассмотрения синхростратума. По характеру информационных связей между автоматами массив представляет собой цепь. Каждый автомат A_i связан с соседом слева A_{i-1} и с соседом справа A_{i+1} . У каждого автомата A_i имеются два входных вектора — слева X_i^I и справа X_i^II , и два выходных вектора Y_i^I и Y_i^II . В таком массиве информационные потоки могут передаваться в обоих направлениях и процессы могут быть инициированы через свободные порты обоих оконечных автоматов, не вызы-



■ Рис. 1. Одномерный массив синхронных автоматов с двухфазной синхронизацией



■ Рис. 2. Одномерный массив автоматов с асинхронным синхростратумом

вая нежелательных коллизий. Другими словами, может быть реализован любой волновой алгоритм, так как синхросигналы T_1 и T_2 обеспечивают правильное взаимодействие между соседними автоматами.

Пример одномерного массива взаимодействующих автоматов с асинхронным синхростратумом показан на рис. 2.

Структура соединений блоков синхростратума BC_1, \dots, BC_4 изоморфна структуре соединений автоматов в массиве. Блоки синхростратума BC_i взаимодействуют с соответствующими автоматами по принципу «запрос — ответ». При этом выходной сигнал «запрос» Z_i блока BC_i синхростратума является сигналом локальной синхронизации автомата, инициирующим начало его работы. После завершения процесса в иницированном автомате A_i он формирует ответный сигнал O_i . При этом соответствующий блок BC_i посылает своим соседям сигналы готовности Γ_i . При такой организации синхростратума каждый автомат получает сигнал локальной синхронизации лишь при условии завершения переходных процессов в автоматах, являющихся его соседями по графу связей между автоматами. В этом заключается отличие от синхронного прототипа, в котором условием срабатывания каждого автомата является завершение переходных процессов во всех автоматах, которые были инициированы предыдущим синхросигналом.

Анализ взаимодействия автоматов в синхронном прототипе

Структура на рис. 1 предполагает, что автоматы взаимодействуют по принципу «ведущий — ведомый». (При этом в каждом автомате, как отмечалось выше, также может использоваться этот принцип, механизм реализации которого встроен в триггеры памяти). Для организации взаимодействия автоматов используются две последовательности синхросигналов T_1 и T_2 . Пусть эти сигналы изменяют свои значения следующим образом:

$$(T_1, T_2) = (0, 0) \rightarrow (1, 0) \rightarrow (0, 0) \rightarrow (0, 1) \rightarrow (0, 0) \rightarrow \dots \quad (*)$$

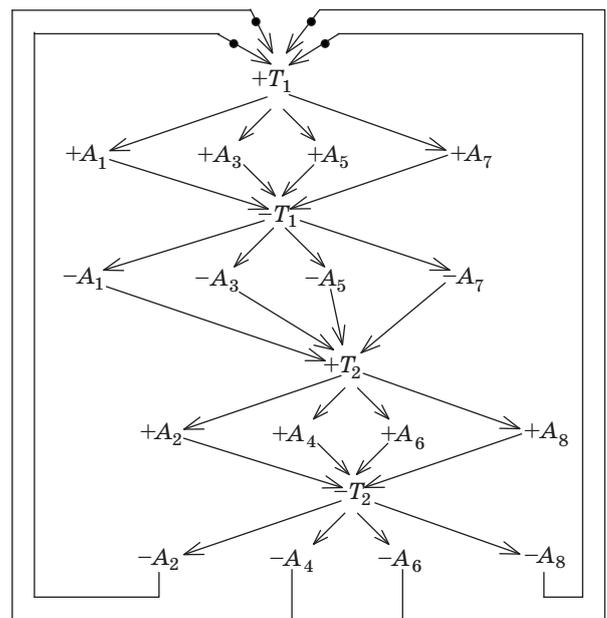
При $(T_1, T_2) = (0, 1)$ нечетные автоматы передают информацию своим соседям — четным автоматам, которые выполняют переход в новое состояние. Таким образом, нечетные автоматы являются ведущими, а четные — ведомыми. При $(T_1, T_2) = (1, 0)$ нечетные автоматы получают информацию от своих соседей — четных автоматов и выполняют переход, т. е. в этом такте нечетные автоматы являются ведомыми, а четные — ведущими.

Рассмотрим множество событий, связанных с приведенным описанием работы автоматов на рис. 1, и дискретизацию физического времени, а также связь дискретного физического времени с логическим. Такими событиями являются $\pm T_1$ и $\pm T_2$ — переключения сигналов синхронизации T_1 и T_2 ; события $+A_i$ и $-A_i$ имеют смысл начала и завершения переходных процессов в автоматах A_i .

Сигнальный граф параллельной двухфазной синхронизации в дискретном времени одномерного массива (см. рис. 1) из восьми автоматов с дисциплиной синхронизации (*) изображен на рис. 3. Граф определяет частичный порядок на множестве событий.

Синхронизация происходит в узловых вершинах графа: вершины $-T_1, +T_2$ ожидают сигналов окончания переходных процессов в нечетных автоматах, а $-T_2, +T_1$ — от четных автоматов.

Заметим, что в рассмотренной структуре синхронизации каждый шаг k в логическом времени, соответствующий одному шагу выполняемого автоматами алгоритма, занимает два такта: T_1 и T_2 . Таким образом, приведенный на рис. 3 граф



■ Рис. 3. Сигнальный граф параллельной двухфазной синхронизации одномерного массива из 8 автоматов

соответствует одному шагу алгоритма (логического времени), раскрывая его во введенных с помощью событий шагах дискретного времени.

Проектирование асинхронного синхростратума для одномерного массива автоматов

С использованием приведенного анализа организации взаимодействия в синхронном прототипе (см. рис. 1) рассмотрим задачу проектирования асинхронного синхростратума (см. рис. 2) для того же процессорного стратума. В общем случае длительность переходных процессов в параллельно работающих автоматах массива может быть разной и не известна в физическом времени. Поэтому их взаимодействие с синхростратумом должно быть организовано по принципу «запрос—ответ» (хендшейка). При этом не имеет значения, какой принцип лежит в основе построения автоматов: свой генератор синхроимпульсов, самосинхронная схема, встроенные задержки и др. Важно только то, что автоматы формируют сигналы O_i об окончании в них переходных процессов в ответ на получение ими локальных сигналов инициации работы Z_i от синхростратума (см. рис. 2).

Возможны два подхода к организации параллельной работы автоматов (как и обработки данных в вычислительной системе): многоэлементная (параллельная) и конвейерная работа. При многоэлементной работе каждый автомат выполняет свою работу от начала до конца параллельно с другим. При конвейерной (многостадийной) работе процесс разбивается на несколько стадий. Автомат выполняет одну из стадий обработки. Завершив свою работу, автомат передает результаты соседнему автомату (например, правому соседу), а затем опять начинает выполнять свою стадию работы с новыми входными данными, полученными от левого соседа. Конвейерная работа автоматов очень похожа на процесс распространения волны, поэтому иногда будем называть процесс организации такой работы волновой синхронизацией. В приведенной на рис. 2 системе волна может распространяться как слева направо, так и справа налево.

Применительно к задаче проектирования синхростратума рассмотрим сначала *организацию конвейерной работы* (волновую синхронизацию).

На вход конвейера поступает последовательность порций обрабатываемых данных. Размер порции (слово, полуслово, двойное слово и пр.) определяется особенностями процессорного стратума и для организации взаимодействия автоматов не имеет значения.

Шагом алгоритма (шагом k логического времени) будем считать полный цикл обработки пор-

ции данных в конвейере. Для конкретизации дальнейшего рассмотрения примем, что массив на рис. 2 содержит 8 автоматов.

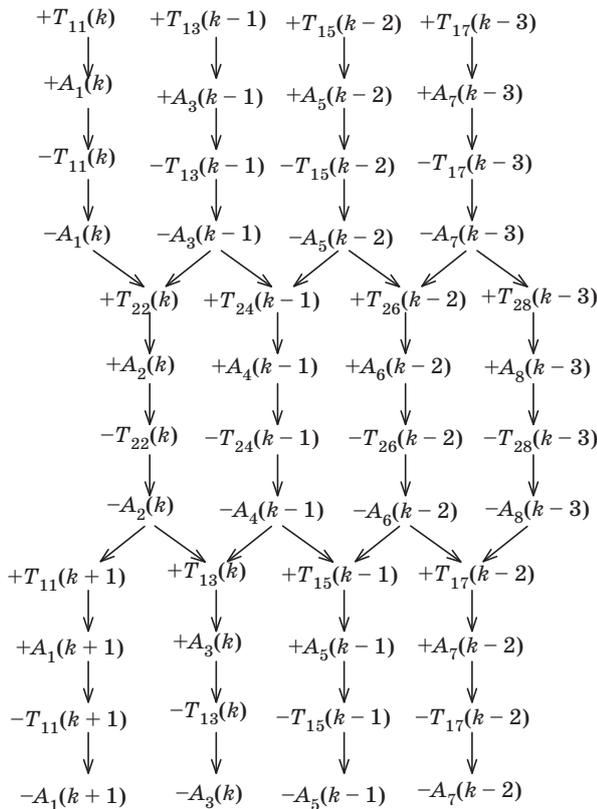
Напомним, что для организации бесконфликтной работы массива автоматов используется принцип «ведущий—ведомый». По аналогии с рис. 1 и 3 будем различать работу автоматов на рис. 2 в нечетном T_1 и четном T_2 тактах. Но теперь эти такты не связаны с внешним генератором. Можно говорить только об аналогии с двухфазной синхронизацией. Для первого автомата A_1 (см. рис. 2) дискретизация непрерывного физического времени связана со следующими событиями: поступление от БС₁ запроса Z_1 , начало работы автомата $+A_1$, завершение работы автомата $-A_1$, формирование ответа O_1 .

Поскольку инициация работы автоматов не связана с внешними часами и может происходить в различные моменты физического времени, для четных и нечетных тактов введем двойную индексацию: T_{11}, T_{13}, \dots — нечетные такты в 1-м, 3-м автомате; T_{22}, T_{24}, \dots — четные такты во 2-м, 4-м автоматах. При этом событие $+T_{11}$ соответствует $+Z_1$, $-T_{11}$ соответствует $-Z_1$, $-A_1$ соответствует O_1 .

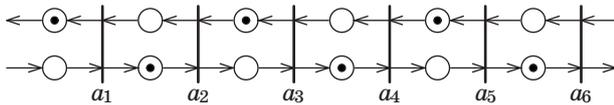
С использованием принятых обозначений на рис. 4 показан фрагмент развертки сигнального графа для структуры, представленной на рис. 2 и содержащей 8 автоматов. В этом графе $\pm T_{ij}(k)$ означает событие, заключающееся в k -м переходе синхросигнала T_{ij} , $i \in \{1, 2\}$, $j \in \{1, n\}$ (шаг k логического времени), которое наступает в j -м автомате массива. Дискретным моментам физического времени соответствуют строки, моменты логического времени указаны в скобках.

Анализируя рис. 4, легко увидеть, что один и тот же момент логического времени существует в различных автоматах массива в различные моменты физического времени и в один и тот же момент физического времени представлены различные моменты логического времени. Рис. 4 представляет общее отношение между сигналами запросов и ответов и может служить спецификацией для проектирования синхростратума. В общем случае реализация синхростратума требует введения в спецификацию дополнительных переменных и специального проектирования. Одно из возможных решений выглядит следующим образом.

Рассмотрим поток событий, связанных с взаимодействием автоматов в массиве рис. 2 при конвейерной работе. Пусть a_j — событие, соответствующее полному циклу синхронизации j -го автомата, т. е. $a_j = +T_{ij} \rightarrow +A_j \rightarrow -T_{ij} \rightarrow -A_j$. Тогда, следуя графу на рис. 4, необходимую координату событий в потоке опишем маркированной сетью Петри (рис. 5). Рис. 5 — это спецификация простого конвейера.



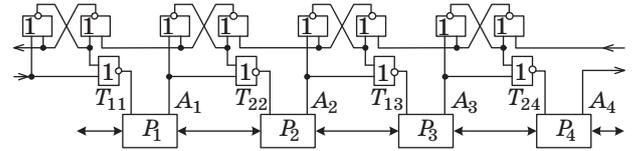
■ Рис. 4. Фрагмент развертки сигнального графа, описывающего волновую логическую синхронизацию в одномерном массиве



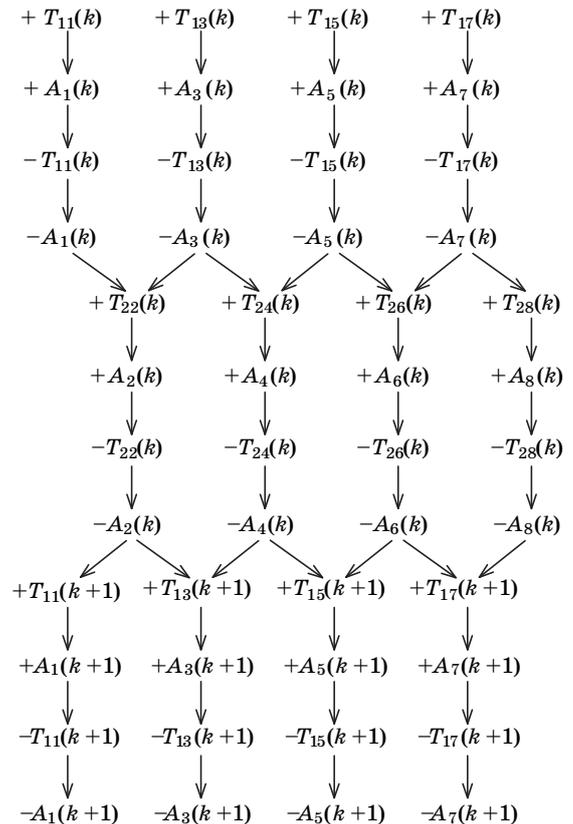
■ Рис. 5. Маркированная сеть Петри, описывающая конвейерное взаимодействие автоматов в одномерном массиве

В работах [7–9] рассмотрена методика перехода от спецификации к реализации на простых распределительных ячейках. Такой переход возможен по той причине, что в конвейере на распределительных ячейках выходной сигнал каждой j -й ячейки совершает полный цикл события a_j и только после этого начинает работать следующая $(j + 1)$ -я ячейка. В результате для рассматриваемого примера получаем достаточно простую схему синхростратума (рис. 6), где сигнал T_{11} соответствует сигналу Z_1 на рис. 2, а сигнал A_1 — сигналу O_1 .

Теперь рассмотрим **организацию параллельной работы** автоматов массива (см. рис. 2) при многоэлементной обработке данных. На рис. 7 показан фрагмент развертки сигнального графа, который описывает параллельную синхронизацию, в отличие от ранее рассмотренного подхода, основанного на распространении волн.



■ Рис. 6. Синхростратум на распределительных ячейках



■ Рис. 7. Фрагмент развертки сигнального графа для параллельной синхронизации одномерного массива

Этот фрагмент отличается от фрагмента на рис. 4 тем, что все параллельные синхросигналы (сигналы T_{11}, T_{13}, \dots) в одной строке (в одинаковый момент физического времени) соответствуют одному и тому же моменту логического времени. Даже беглого взгляда на рис. 4 и 7 достаточно, чтобы сделать заключение, которое кажется тривиальным и в то же время неожиданным.

Эти графы отличаются только маркировкой моментов логического времени (в скобках). Следовательно, одна и та же схема синхростратума в зависимости от принятого соглашения о маркировке моментов логического времени (т. е. в зависимости от функций перехода и выхода автоматов) может обеспечить либо параллельную, либо волновую систему глобальной синхронизации.

При синтезе схемы синхростратума по сигнальному графу, представляющему исходную

спецификацию, этот граф, согласно разработанной методике [7–9], должен быть приведен к корректному виду посредством введения в него дополнительных переменных¹. С их помощью устраняются конфликты кодирования состояний схемы. Было найдено удивительно простое решение (рис. 8).

В этом графе сигналы $\pm X_i$ и $\pm Y_i$ являются дополнительными переменными. Полученный сигнальный граф реализуется очень простой схемой (рис. 9).

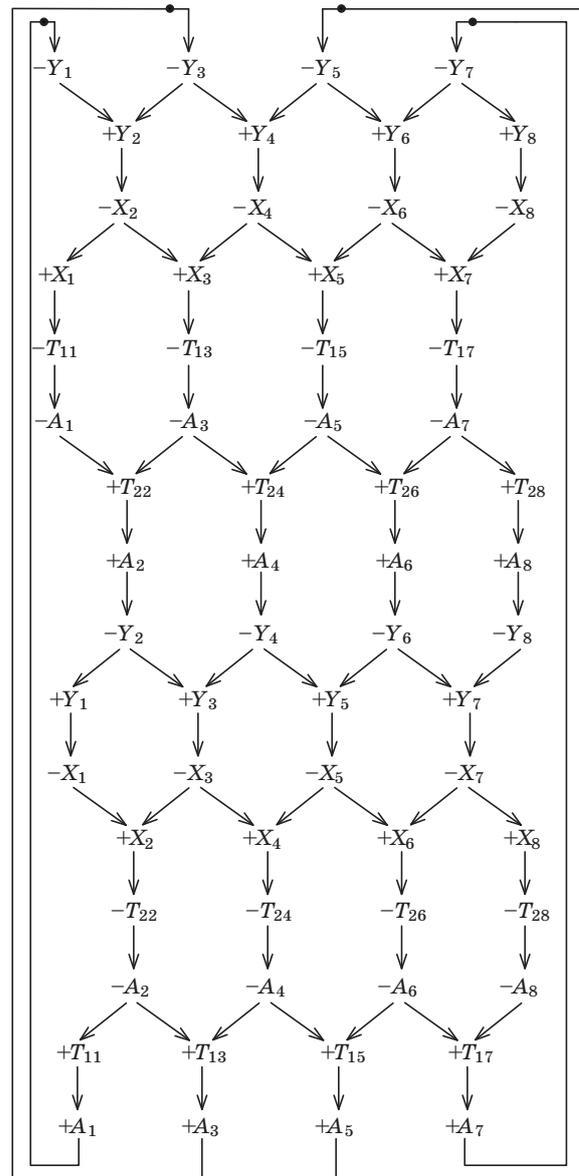
Теперь рассмотрим синхростратум для системы из автоматов, помещенных в вершины произвольного графа. Дуги графа соответствуют связям между автоматами. Согласно принятой дисциплине синхронизации (с двумя синхронизирующими системами T_{1j} и T_{2j}), граф связи должен быть двудольным (графом Кёнига) [10].

Сведение произвольного графа связей к графу Кёнига тривиально; например, это можно сделать вставкой буферных регистров во все связи. Заметим, что это вообще не должно влиять на общую стратегию синхронизации, так как сама стратегия синхронизации, как упоминалось выше, инвариантна семантике поведения синхронизированного автомата. Вставка буферных регистров может быть полезной независимо от типа графа соединений автоматов, особенно если цикл работы автомата значительно длиннее цикла записи в буферные регистры. При таком подходе сигналы $T_{1j} = 1$ иницируют активность автоматов, а сигналы $T_{2j} = 1$ иницируют циклы записи в буферные регистры.

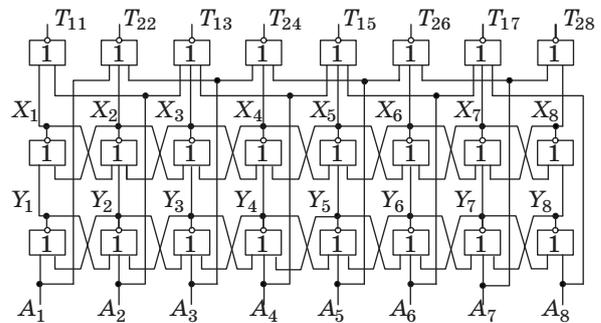
Для достижения большей степени параллелизма могут быть использованы автоматы с более сложной внутренней организацией. Однако эти проблемы связаны со стратегией формирования сигналов окончания переходных процессов в автоматах и методами внутри автоматной синхронизации, что выходит за рамки исследуемой проблемы.

Еще раз подчеркнем, что рассматриваемый здесь подход, связанный с декомпозицией системы на синхростратум и процессорный (автоматный) стратум, позволяет разделить проблемы глобальной синхронизации и алгоритмического поведения автоматов.

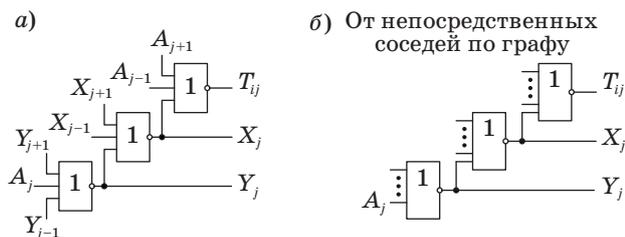
¹ Процедура приведения спецификаций асинхронных схем к корректному виду является сложной научной проблемой. Разработанные алгоритмы реализованы во многих системах проектирования асинхронных схем, например в системе **Petrify**. От способа введения в сигнальный граф дополнительных переменных, необходимых для устранения конфликтов состояний в схеме, зависит сложность реализации. Рассматриваемые здесь схемы синхростратумов построены ручным способом непосредственно по их сигнальным графам, что требует определенного навыка проектирования.



■ Рис. 8. Правильный сигнальный граф для параллельной синхронизации одномерного массива



■ Рис. 9. Синхростратум для параллельной синхронизации одномерного массива из 8 автоматов



■ Рис. 10. Схема элемента синхростратума: а — для одномерного массива; б — для произвольного графа (Кёнига) сети автоматов

Возвратимся к рис. 9 и рассмотрим локальные свойства схемы синхростратума, гарантирующие правильность ее поведения.

Во-первых, в слое вентилях, с выходов которых снимаются сигналы T_{1j} и T_{2j} , связи между соседними вентилями (через автоматы A_j) обеспечивают переключение вентиля из состояния 0 в состояние 1, если и только если выходные сигналы всех соседних вентилях равны 0.

Во-вторых, переключение вентиля с выходом T_{ij} из состояния 0 в состояние 1 должно быть детерминированным. Следовательно, необходима память для сохранения его предыдущего состояния; такая память организована на двух слоях вентилях с выходами X_j и Y_j . Каждый из этих выходов может переключиться в состояние 1 не раньше, чем два его боковых соседа переключат-

ся в 0. Поэтому связи вентилях X_j и Y_j со своими боковыми соседями аналогичны связям между вентилями T_{ij} .

Схема элемента синхростратума (см. рис. 9) изображена на рис. 10, а. Соблюдая требования к локальному поведению вентилях, с учетом числа соседей можно построить, по аналогии с этой схемой, схему элемента синхростратума для произвольного графа Кёнига (рис. 10, б).

Заклучение

Представленный результат по глобальной синхронизации массивов многоблочных (многопроцессорных) систем соответствует случаю существования синхронного прототипа с двухфазной синхронизацией, использующей принцип «ведущий—ведомый».

Показано, что для любой глобально синхронной системы можно спроектировать систему асинхронной глобальной синхронизации (координации). Система может иметь любую топологию связей. Для этого достаточно снабдить блоки системы сигналами окончания в них переходных процессов и построить синхростратум из модулей, например, типа модулей рис. 10.

Интересные результаты могут быть получены при использовании в качестве синхронного прототипа не двухфазной, а многофазной синхронизации. Эта тема требует отдельного рассмотрения.

Литература

1. Varshavsky V., Marakhovsky V. GALA (Globally Asynchronous — Locally Arbitrary) Design // Concurrency and Hardware Design, Advances in Petri Nets: LNCS 2549 / Eds. J. Cortadella, A. Yakovlev, G. Rozenberg. Springer, 2002. P. 61–107.
2. Угрюмов Е. П. Цифровая схемотехника. СПб.: — БХВ-Петербург, 2007. — 800 с.
3. Varshavsky V. I., Chu T.-A. Self-Timing — Tools for Hardware Support of Parallel, Concurrent and Event-Driven Process Control: Proc. of the Conf. on Massively Parallel Computing Systems (MPCS). May 1994. P. 510–515.
4. Varshavsky V. I., Marakhovsky V. B., Chu T.-A. Logical Timing (Global Synchronization of Asynchronous Arrays) // Parallel Algorithm / Architecture Synthesis: Intern. Symp., Aizu-Wakamatsu, Japan. IEEE CS Press, Mar. 1995. P. 130–138.
5. Varshavsky V. I., Marakhovsky V. B., Chu T.-A. Asynchronous Timing of Arrays with Synchronous Prototype: Proc. of the Second Intern. Conf. on Massively Parallel Computing Systems (MPCS'96), Ischia, Italy, May 1996. P. 47–54.
6. Varshavsky V. I., Marakhovsky V. B. Global Synchronization of Asynchronous Arrays in Logical Time // Parallel Algorithm / Architecture Synthesis: Proc. of the Second Intern. Symp., Aizu-Wakamatsu, Japan. IEEE CS Press, Mar. 1997. P. 207–215.
7. Varshavsky V. Hardware Support of Parallel Asynchronous Processes. Helsinki University of Technology, Digital Systems Laboratory. Ser. A: Research Reports: Sept. 1987. N 2.
8. Варшавский В. И., Кишиневский М. А., Мараховский В. Б. и др. Автоматное управление асинхронными процессами в ЭВМ и дискретных системах / Под ред. В. И. Варшавского. — М.: Наука, 1986. — 308 с.
9. А. с. 1064461 СССР. Асинхронный распределитель / Варшавский В. И., Кишиневский М. А., Мараховский В. Б. и др. (СССР). 1983.
10. König D. Theorie der Endlichen und Unendlichen Graphen. Leipzig: Akad. Verlag M. B. H., 1936, 258SS; N. Y.: Chelsea, 1950. Zbl, 15, 375.

УДК 004.415.2

КЛАССИФИКАЦИЯ И АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПРОГРАММНО-АППАРАТНОЙ ПОДДЕРЖКИ ПРОЦЕДУР ТРЕНИНГА ЭМОЦИОНАЛЬНОГО САМОКОНТРОЛЯ ЧЕЛОВЕКА

Ю. В. Чернухин,

доктор техн. наук, профессор

Таганрогский технологический институт Южного федерального университета

А. М. Унакафов,

заведующий сектором разработки программного обеспечения, аспирант

ЗАО «ОКБ «Ритм»

На основе построенной классификации существующих методов программно-аппаратной поддержки процессов тренинга эмоционального самоконтроля человека проведен их анализ. Вводятся понятия неадаптивных, адаптивных, интеллектуальных, пассивных и активных методов поддержки тренинга, рассматриваются основные тенденции в развитии этих направлений. Обсуждаются вопросы разработки и синтеза интеллектуальных методов поддержки тренинга эмоционального самоконтроля.

Ключевые слова — биологическая обратная связь, тренинг эмоционального самоконтроля, интеллектуальные методы.

Введение

В настоящее время в связи с широким использованием автоматизированных систем большое значение приобретает обеспечение работоспособности операторов, управляющих этими системами. Ошибки, связанные с утомлением, болезнью или неблагоприятным психологическим состоянием оператора могут приводить к материальным потерям, к загрязнению окружающей среды, к гибели людей и другим неблагоприятным последствиям. В связи с этим актуальной задачей является создание методов коррекции психоэмоционального состояния человека и средств их программно-аппаратной поддержки.

Большая часть методов коррекции эмоционального состояния человека основана на использовании биологической обратной связи (БОС). Применение БОС предполагает привлечение личности человека к процессу регуляции функций организма, что обеспечивает не просто коррекцию эмоционального состояния (т. е. изменение извне) человека, а тренинг его самоконтроля. Это позволяет не только бороться с последствиями стрессов, но и повышать устойчивость к ним и, в результате, предотвращать снижение работоспособности, возникновение психологических

расстройств, функциональных и психосоматических заболеваний.

Данная работа посвящена анализу основных методов программно-аппаратной поддержки процессов тренинга эмоционального самоконтроля человека.

Классификация методов программно-аппаратной поддержки тренинга эмоционального самоконтроля

Сформулируем основные критерии, по которым можно классифицировать рассматриваемые методы.

По степени индивидуализации воздействий, исходя из особенностей конкретного человека, известные методы поддержки тренинга можно классифицировать как неадаптивные, адаптивные и интеллектуальные.

В неадаптивных методах механизм коррекции процедуры в зависимости от результатов воздействия на тренирующегося отсутствует, что предполагает большую нагрузку на проводящего процедуру специалиста (далее — специалиста). Адаптивные методы содержат механизм автоматической настройки воздействия на тренирующегося в зависимости от его состояния. В интел-



■ *Рис. 1. Схема классификации методов программно-аппаратной поддержки тренинга эмоционального самоконтроля*

лектуальных методах этот механизм более развит и позволяет осуществлять экспертное оценивание состояния тренирующегося, вырабатывать тактику воздействия и при необходимости давать рекомендации.

Важность выделения интеллектуальных методов из класса адаптивных связана с различием в возможностях, предоставляемых этими методами специалисту. Интеллектуальный метод должен позволять автоматически настраивать все параметры процедуры, регулировка которых предусмотрена методически, и оценивать ход курса тренинга в целом, в то время как в адаптивных методах предполагается только автоматический выбор базовых параметров тренировки, а контроль состояния тренирующегося не является обязательным. Таким образом, если адаптивные методы — лишь удобный инструмент для специалиста, то интеллектуальный метод является его надежным помощником, обеспечивающим оптимальность проводимых процедур, а в перспективе, возможно, и способным заменить самого специалиста.

Успешность тренинга эмоционального самоконтроля человека с помощью БОС всегда зависит от уровня мотивации самого тренирующегося. В связи с этим среди методов программно-аппаратной поддержки процессов тренинга эмоционального самоконтроля человека целесообразно выделить пассивные и активные методы (рис. 1). Под пассивностью понимается отсутствие в самом методе механизма обеспечения мотивации тренирующегося. Пассивные методы могут быть эффективны для тренировки людей с достаточным уровнем мотивации; в иных случаях они требуют от специалиста усилий по под-

держанию мотивации тренирующегося на должном уровне. Активные методы сами стимулируют повышение мотивации тренирующегося, что позволяет облегчить, и иногда — существенно, работу специалиста. Способы поддержания мотивации могут быть различными, например проведение тренинга в привлекательной для тренирующегося игровой форме. Следует отметить, что с ростом сложности процесса тренинга растет важность активности реализующего его метода, так как при простых и ясных заданиях тренирующему проще сохранять мотивацию. Интеллектуальные методы могут быть только активными — разработка пассивных интеллектуальных методов нецелесообразна, так как тренинг с помощью пассивного метода всегда требует активного участия специалиста.

Неадаптивные методы

Большая часть существующих методов относится к категории пассивных, причиной этого является простота их разработки. Широко используются простые неадаптивные методы поддержки тренинга, сводящиеся к предъявлению тренирующемуся его психофизиологических реакций. Также к пассивным неадаптивным методам относится метод, предлагаемый М. Вудом с соавторами [1]. На основе анализа фотоплетизмограммы (ФПГ) рассчитывается и предъявляется комплексный индекс стресса, характеризующий состояние тренирующегося, и даются рекомендации по коррекции ритма дыхания. В результате процедур тренирующийся учится контролировать свое состояние и преодолевать стресс. Досто-

инством метода является его простота. Однако метод не учитывает индивидуальные особенности каждого человека, имеет ряд противопоказаний, а успешность его применения не подтверждена на практике.

По сравнению с пассивными методами, активные более эффективны. Одной из основных тенденций в разработке активных методов является использование игровых форм представления обратной связи вместо традиционных (графики, звуковые сигналы). Это позволяет поднять заинтересованность тренирующегося в процессе и результатах тренинга [2]. Так, например, интересна идея программно-аппаратного модуля, позволяющего использовать в качестве представления БОС по электроэнцефалограмме (ЭЭГ) любую простую видеоигру [3]. Недостатком игрового подхода является его избирательная эффективность. Не каждому человеку свойственен игровой азарт, тем более это касается людей с психологическими расстройствами и в состоянии переутомления. Для них привлекательность игры может оказаться пониженной.

Другой подход к обеспечению активности метода состоит в том, что при отклонении параметров психофизиологических сигналов от требуемых значений на тренирующегося оказывается дискомфортное воздействие (безопасное, но достаточно неприятное, чтобы мотивировать тренирующегося на изменение своего состояния с целью избежать воздействия).

Активность метода «Реакор» [4] обеспечивается совместным использованием игрового и раздражающего подходов. Схема функционирования метода представлена на рис. 2 (АУТ — алгоритм управления тренингом).



■ Рис. 2. Метод «Реакор»

Метод основан на использовании комплексной БОС с 10 физиологическими сигналами: ЭЭГ, ФПГ, электрокардиограмма (ЭКГ), электромиограмма (ЭМГ) и др. «Реакор» позволяет проводить тренинг индивидуально для каждого человека. Реакции тренирующегося могут предъявляться ему различным образом. При выходе физиологических сигналов за заданные специалистом пороги на тренирующегося производится дискомфортное воздействие (звуковое, визуальное либо электрическое).

Основным достоинством метода «Реакор» является его комплексность — за счет большого количества вариантов проведения процедуры можно составить индивидуальную программу тренировок и достигнуть оптимального результата у большинства тренирующихся. Специалист имеет большую свободу выбора тактики терапии.

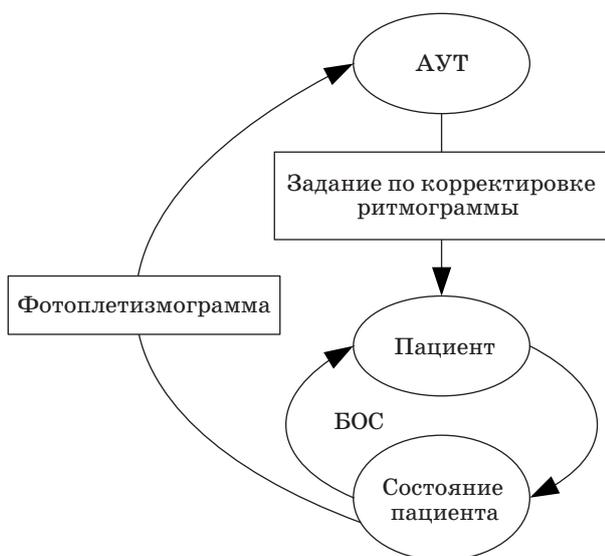
Очевидный недостаток метода — его слабая автоматизация (большая часть работы и принятие всех решений остаются за специалистом). Каким бы удобным интерфейсом не обладал комплекс, освоение всех его возможностей требует длительного времени, а успешный подбор и конфигурирование процедур — высокого профессионального уровня психофизиолога.

Итак, общими недостатками неадаптивных методов являются их избирательная эффективность (в случае простых методов) и высокая нагрузка на специалиста (в случае сложных методов).

Адаптивные методы

Повысить эффективность тренинга позволяют адаптивные методы. Так, Н. Б. Суворов с соавторами [5, 6] формулирует пассивный адаптивный метод (рис. 3), основанный на выработке навыка контроля ритма сердца с помощью БОС по кардиоритмограмме (КРГ) — знакопеременном кардиотренинге. Тренирующемуся предъявляется его КРГ и предлагается корректировать ритм сердца до достижения КРГ эталонного вида. Если в результате процедуры не удается добиться успеха, для следующей процедуры эталон автоматически корректируется, приближаясь к КРГ тренирующегося, в противном случае, напротив, усложняется. Работоспособность метода подтверждается исследованиями. После короткого курса у большинства операторов, проходивших тренинг, значительно улучшились основные показатели работы. Метод реализован в рамках комплекса «Кардиотренинг».

Достоинства метода Суворова особенно заметны при сравнении с близким ему методом Вуда [1]. Это, в первую очередь, его адаптивность и подтвержденная эффективность применения. Для предотвращения физиологически неприем-



■ Рис. 3. Метод Суворова

лемых реакций тренирующегося (гипервентиляция, брадикардия, тахикардия и т. п.) при формировании задания по корректировке КРГ используются аналитический блок и экспертная система [7], что приближает рассматриваемый метод к интеллектуальным. Можно предположить, что дальнейшая «интеллектуализация» метода Суворова (дополнение его аналитическими блоками, не только предотвращающими установку некорректных параметров тренировки, но и определяющими их оптимальные значения для каждого тренирующегося) позволит повысить скорость и эффективность тренировки.

Представляется, что недостатком рассматриваемого метода является его пассивность (отметим, что в силу относительной простоты процесса тренинга в данном случае этот недостаток не слишком существен). Так как сама по себе методика знакопеременного кардиотренинга не обеспечивает поддержание мотивации тренирующегося, можно ожидать, что доработка программно-аппаратного метода поддержки процедур кардиотренинга в части повышения их привлекательности для тренирующегося способна повысить эффективность его использования.

Интерес представляет подход, разработанный Е. И. Поповой с соавторами [8]. Его суть состоит в том, что у тренирующегося вырабатывают условный рефлекс — реакцию испуга на нейтральный стимул (например, звук), сопровождая его электрораздражением. Затем, с помощью БОС по кожно-гальванической реакции (КГР), тренирующегося побуждают подавлять свой страх, объясняя, что если он сможет преодолеть испуг при подаче звукового стимула так, что КГР не

превысит определенного порога, то электровоздействия не будет. При удачном выполнении текущего задания следующее усложняется (снижается порог). Курс тренировок считается успешно завершенным, если реакция тренирующегося не превысила порог ни разу за процедуру.

На основе этого подхода было разработано несколько активных адаптивных методов поддержки процесса тренинга самоконтроля. Одним из наиболее перспективных представляется метод «ИНТЭКС» [9] (рис. 4).

Курс ИНТЭКС-тренировок состоит из трех этапов.

Этап 1. У тренирующегося угасает ориентировочный рефлекс на звуковые сигналы высокого и низкого тона. Этап завершается, если в начале очередного сеанса реакция на *оба* раздражителя достаточно слабая.

Этап 2. Тренирующемуся предъявляются те же два раздражителя, сигнал высокого тона сопровождается дискомфортным электровоздействием. У тренирующегося вырабатывается условный рефлекс: сигнал высокого тона — «опасность». Этап завершается, если в начале очередного сеанса реакция на сигнал высокого тона (без дискомфортного электровоздействия) значительно превосходит реакцию на сигнал низкого тона.

Этап 3. Тренирующийся волевыми усилиями подавляет реакции на звук высокого тона. Если реакция не превысит текущего порога, для следующего сравнения он понижается. Если реакция превысит порог, автоматически наносится дискомфортное воздействие, а порог не изменяется. Этап и курс в целом завершаются, если за занятие не было ни одного электровоздействия, т. е. порог ни разу не был превышен.

Процедура может проводиться без участия специалиста. Для этого предусмотрена возмож-



■ Рис. 4. Метод «ИНТЭКС»

ность подачи стимулов в автоматическом режиме и установка пороговых значений по умолчанию.

Достоинством метода «ИНТЭКС» является его высокая автоматизируемость (в методе заложены способы определения состояния тренирующегося в целом и по отношению к процессу тренинга, что позволяет строить индивидуальные курсы тренировок). Опыт использования комплекса «ИНТЭКС» показывает его высокую практическую эффективность.

Интеллектуальные методы

Однако даже высокая адаптивность метода «ИНТЭКС» оказывается ограниченной. Метод позволяет вырабатывать требуемые навыки не более чем у 50 % тренирующихся, работа с остальными требует индивидуального подхода, т. е. участия в процедурах опытных специалистов.

Данное обстоятельство в той или иной степени характерно для всех адаптивных методов. По этой причине весьма актуальна задача разработки интеллектуальных методов, свободных от этого недостатка. В ряде источников (см., например, [10]) формулируются общие идеи, касающиеся разработки интеллектуальных методов, однако в полной мере задача их синтеза пока не решена. В то же время на основе проведенного в данной работе анализа можно заключить, что разработка интеллектуальных методов весьма перспективна на базе рассмотренных методов. Действительно, в этом случае необходимо дополнить обобщенный адаптивный метод интеллектуальным модулем (ИМ), обеспечивающим построение модели состояния человека на основе анализа его

физиологических параметров и психологического статуса. В результате моделирования модуль должен формировать предположения об особенностях динамики эмоционального состояния тренирующегося и автоматически подбирать оптимальные параметры тренинга. По ходу курса модуль должен отслеживать динамику состояния тренирующегося и при ее отклонении от предсказанной корректировать модель.

Структура интеллектуального метода, построенного в соответствии с данным подходом, представлена на рис. 5. Управление в интеллектуальном методе может осуществляться либо ИМ (что удобно в *простых* ситуациях), либо специалистом (в *сложных* ситуациях, требующих индивидуального подхода). При этом ИМ можно обучить, т. е. сложной окажется лишь ситуация, встреченная впервые. Следует отметить, что для эффективного функционирования ИМ требуется больше информации, чем механизму коррекции процесса тренинга в адаптивных методах. В связи с этим следует использовать, по меньшей мере, два физиологических сигнала (например, КГР и ФПГ, простые для съема и информативные), а также исследовать психологические особенности тренирующегося.

Заключение

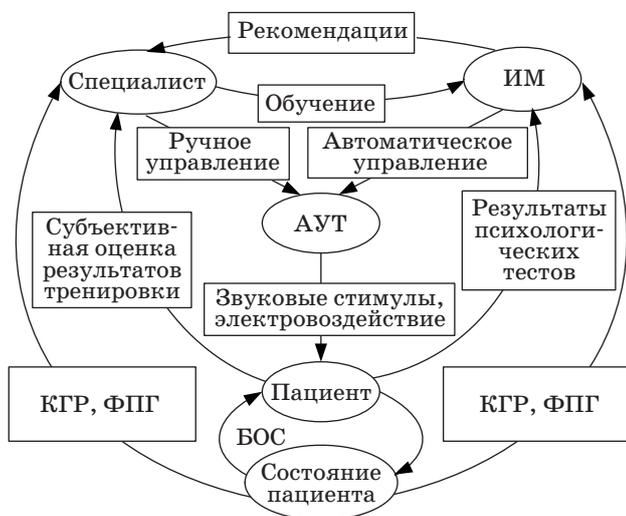
Проведенный анализ позволяет сделать следующие выводы.

1. В настоящее время неадаптивные и адаптивные методы программно-аппаратной поддержки тренинга эмоционального самоконтроля человека близки к пределу в своем развитии: дальнейшее их методическое совершенствование возможно, но преимущественно путем усложнения, что может затруднить использование метода даже специалистами.

2. В то же время представляется, что эффективность многих методов может быть улучшена за счет повышения их активности, т. е. дополнения механизмами повышения мотивации тренирующегося (например, за счет использования игрового представления обратной связи).

3. Другим направлением повышения эффективности и удобства применения методов программно-аппаратной поддержки тренинга является дополнение их ИМ, обеспечивающими автоматизацию процедур и выдачу проводящему процедуру специалисту рекомендаций по повышению эффективности и безопасности тренинга.

4. В целом разработка активных интеллектуальных методов на базе существующих адаптивных, в частности, основываясь на принципах, сформулированных в настоящей работе, представляется перспективной и актуальной.



■ Рис. 5. Схема предлагаемого интеллектуального метода

Литература

1. Wood M., Forbes A., Rhys K. Methods and devices for relieving stress: United States Patent, Publication Number WO/2005/089856, 29.09.2005.
2. Джафарова О. А., Донская О. Г., Зубков А. А. и др. Технология игрового биоуправления // Биологическая обратная связь. 1999. № 3. С. 14–17.
3. Pallson O., Harris R., Pope A. Method and apparatus for encouraging physiological self-regulation through modulation of an operators control input to a video game or training simulator: United States Patent, Publication Number WO/2001/004864, 18.01.2001.
4. Адамчук А. В., Захаров С. М., Скоморохов А. А. Полифункциональный мультипараметрический реабилитационный комплекс для биоуправления // Биоуправление-4: теория и практика / ЦЭРИС. Новосибирск, 2002. С. 287–291.
5. Suvorov N. B. Psychophysiological Training of operators in adaptive biofeedback cardiorythm control // The Spanish Journal of Psychology. 2006. Vol. 9. N 2. P. 193–200.
6. Гусева Н. Л., Меницкий Д. Н., Булгакова О. С., Суворов Н. Б. Адаптивное биоуправление в психофизиологической подготовке операторов // Бюл. Сибирского отделения Российской академии медицинских наук. 2004. № 3 (113). С. 18–24.
7. Суворов Н. Б. Информационная составляющая в биоуправлении функциональным состоянием человека // Информационно-управляющие системы. 2002. № 1. С. 57–64.
8. Попова Е. И., Ивонин А. А., Шуваев В. Т., Михеев В. Ф. Нейрофизиологические механизмы формирования навыка сопротивления страху под контролем биологической обратной связи по кожно-гальванической реакции // Журнал высшей нервной деятельности. 2002. Т. 52. № 5. С. 563–569.
9. Трембач А. Б., Трембач Г. А., Унакафов М. А. Лечение синдрома раздраженного кишечника с помощью тренажера «ИНТЭКС» // Изв. Южного федерального университета. Технические науки. 2008. № 6. С. 140–144.
10. Bersak D. et al. Intelligent Biofeedback using an Immersive Competitive Environment. <http://medialabeurope.org/mindgames/publications/publicationsAtlanta2001rev3.pdf> (дата обращения: 20.12.2008).

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

Журнал «Информационно-управляющие системы» выходит каждые два месяца. Стоимость годовой подписки (6 номеров) для подписчиков России — 3600 руб., для зарубежных подписчиков — 4200 руб., включая НДС 18 % и почтовые расходы.

На электронную версию нашего журнала вы можете подписаться на сайте *РУНЭБ* (<http://www.elibrary.ru>).

Подписку на печатную версию журнала можно оформить в любом отделении связи по каталогам:

«Роспечать»: № 48060 — годовой индекс, № 15385 — полугодовой индекс;

«Пресса России» — № 42476,

а также используя услуги посредников:

«Издательский дом «Экономическая газета»:

Москва, тел.: (499) 152-88-51, 661-20-30, e-mail: akdi@akdi.ru, izdatcat@eg-online.ru;

«Северо-Западное Агентство «Прессинформ»:

Санкт-Петербург, тел.: (812) 335-97-51, 337-23-05, факс: (812) 337-16-27,

e-mail: press@crp.spb.ru, zayavka@crp.spb.ru, сайт: <http://www.pinform.spb.ru>;

Подписное агентство «МК-Периодика» (РФ + 90 стран):

тел.: (495) 681-91-37, 681-87-47, факс: (495) 681-37-98,

e-mail: export@periodicals.ru, сайт: <http://www.periodicals.ru>;

«Информнаука» (РФ + ближнее и дальнее зарубежье):

тел.: (495) 787-38-73 (многоканальный), факс: (495) 152-54-81,

e-mail: Alfimov@viniti.ru, сайт: <http://www.informnauka.com>;

«Артос-Гал»:

Москва, тел.: (495) 603-27-28, 603-27-33, 603-27-34, факс: (495) 603-27-28,

сайт: <http://www.artos-gal.mpi.ru/index.html>;

«Интерпочта»:

Москва, тел.: (495) 500-00-60, 580-95-80,

e-mail: interpochta@interpochta.ru, сайт: <http://www.interpochta.ru>;

Краснодар, тел.: (861) 210-90-00, 210-90-01, 210-90-55, 210-90-56, e-mail: krasnodar@interpochta.ru;

Новороссийск, тел.: (8617) 67-04-74;

и др.

УДК 004.932.2

АНАЛИЗ ВТОРИЧНОЙ ИНФОРМАЦИИ В JPEG

П. С. Санкин,¹

аспирант

М. Ю. Литвинов,

соискатель

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Рассматриваются особенности передачи информации в последовательностях изображений, сжатых по алгоритму JPEG. Исследуется проявление вторичной информации в JPEG при разборе кодером случайных данных. Для повышения эффективности обработки при маскировании изображений вводится математическое описание модели, обеспечивающей эффективную стратегию сокрытия всей информации в JPEG-изображениях.

Ключевые слова — свойства изображений, вторичная информация, JPEG.

Введение

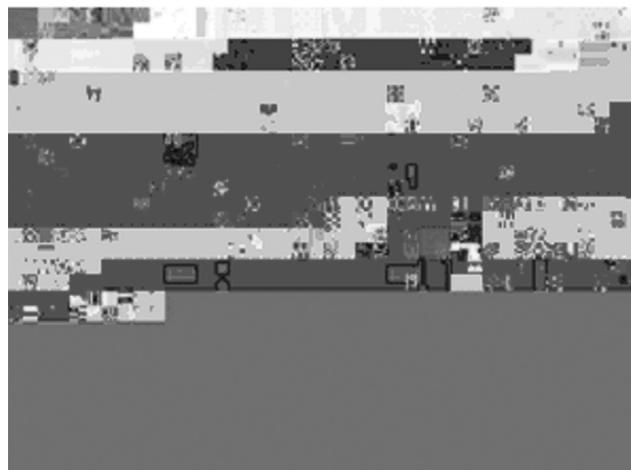
Цифровые видеопотоки, передаваемые в системах видеоконтроля, охранного телевидения, дистанционного мониторинга распределенных охраняемых объектов и др., для сохранения их конфиденциальности, как правило, маскируют путем приведения тела кадра к шумоподобному виду. Однако анализ маскированных данных показывает, что имеется вторичная информация, косвенно характеризующая передаваемые изображения [1]. Видеоданные обладают большой степенью временной и пространственной избыточности, удаление которой приводит к появлению переменной битовой скорости передачи, являющейся слабым местом потока при анализе данных в канале от цифровой камеры к видеосерверу. Для форматов, использующих сжатие, такой информацией является размер кадра.

Анализ изменения параметров, зависящих от характеристик изображения, позволяет сделать выводы о наличии или отсутствии движения в наблюдаемой области, о ее освещенности и контрастности, что крайне нежелательно.

В защищенном изображении, сжатом до маскирования по стандарту JPEG, при отображении его декодером проявляются однотонные полосы, которые периодически довольно резко меняют свой цвет. Кроме того, часто при заданном

разрешении изображения отображается не вся область, а только некоторая часть, после которой идет фон (рис. 1).

Для объяснения данных эффектов в маскированных (т. е. фактически для случайных) данных необходимо подробно описать формат сжатия JPEG и этапы разбора данных кодером. Так как JPEG является блоковым кодеком, мы имеем блоковые искажения: каждому блоку соответствует один блок MCU (Minimum Coded Unit — минимальный кодируемый блок). Для рассмотрения интерпретации шума применительно к разбору JPEG-декодером блоков изображения нужна математическая модель, описывающая средний размер MCU для случайных значений коэффициентов.



■ Рис. 1. Маскированный кадр JPEG

¹ Научный руководитель — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой безопасности информационных систем Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения Е. А. Крук.

Структура кадра

Согласно спецификации [2], изображение, закодированное алгоритмом JPEG, имеет строго определенную структуру (рис. 2). Файл состоит из сегментов маркеров и закодированных энтропийным кодером сегментов данных (ECS — Entropy-Coded Data).

Самой крупной единицей кодирования во всех режимах является образ (image), т. е. само изображение. Изображение содержит только один кадр (frame) в последовательном или прогрессивном режимах, и этот кадр идентичен самому изображению. В иерархическом режиме изображение разделяется на несколько кадров.

Следующий уровень разбиения данных — скан (scan), который содержит часть информации изображения. Разделение на сканы в разных режимах осуществляется по-разному. Закодированные кодером данные помещаются в сегменты ECS, которые состоят из блоков MCU.

Сегменты маркеров содержат признак маркера и тело маркера, состоящего, в свою очередь, из поля с размером маркера и набора параметров, характерных для каждого маркера. Признак маркера — это двухбайтовое значение, всегда начинающееся с байта FF. Файл JPEG может содержать следующие маркеры.

1. SOI и EOI. Каждый кадр JPEG должен начинаться с маркера SOI (Start of Image — начало изображения) и завершаться маркером EOI (End of Image — конец изображения). Эти два маркера не имеют тела.

2. DHT (Define Huffman Tables), в теле которого задаются таблицы Хаффмана для сжатия без потерь.

3. DQT (Define Quantization Table), в теле которого определяются таблицы квантования.

4. SOF (Start of Frame) — маркер, определяющий заголовок кадра, в теле которого описываются разрешение, число компонент, формат вы-

борки (прореживания) для каждой компоненты, индекс таблицы квантования для компоненты и т. п.

5. SOS (Start of Scan) — маркер, описывающий скан. В теле этого маркера содержится описание числа компонент в скане, индексы таблиц для энтропийного кодера и т. п.

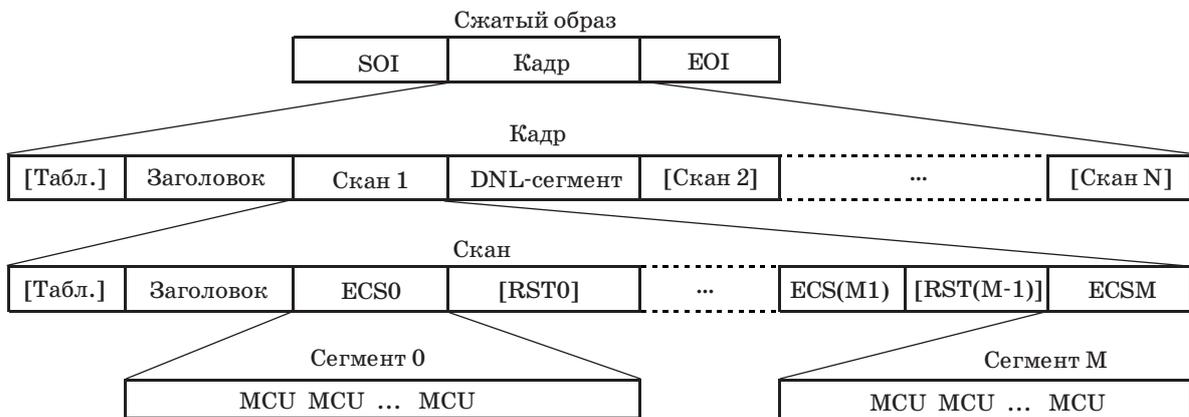
6. Маркеры DNL, RST, DRI (маркеры числа строк, рестарта, интервала рестарта) разделяют сегменты ECS и позволяют синхронизироваться декодеру после ошибок передачи закодированных данных.

7. APPn — пользовательские маркеры, позволяющие добавлять в файл дополнительные данные.

Следует отметить, что маркеры в файле JPEG могут идти в различной последовательности и повторяться (например, для задания двух таблиц квантования используются два разных маркера DQT). Для вычисления размера заголовка, т. е. длин всех маркеров, необходимо просматривать файл и суммировать длины всех сегментов маркеров. Формат не допускает появления в этом блоке других маркеров, поэтому во избежание сбоя при заполнении блока производится замена всех похожих на маркеры данных — позади встретившегося байта FF ставится байт 00.

Изначально все изображение разбивается на блоки 8 × 8 пикселей. Такой блок называется единицей данных DU (Data Unit). Обработка ведется макроблоками, размер которых определяется в зависимости от типа изображения (цветное, оттенки серого и т. п.). Согласно формату, такой макроблок называется минимальным кодируемым блоком.

Для изображения в оттенках серого (grayscale mode) используется одна компонента — яркостная. В этом случае MCU состоит из одного блока 8 × 8. Обход файла осуществляется построчно слева направо сверху вниз, и режим называется «без чередования» (non-interleaved order).



■ Рис. 2. Общая структура файла JPEG

Для цветного изображения обычно, а в основном режиме (baseline jpeg) — всегда, используются три компонента (одна яркостная (Y) и две цветоразностные (Cr, Cb)). Так как глаз маловосприимчив к цветовой составляющей по сравнению с яркостной, для цветоразностных компонент обычно используется прореживание, что позволяет дополнительно сжать изображение.

Каждый минимальный кодируемый блок сжимается без потерь кодером Хаффмана (либо арифметическим кодером, который используется редко). Блок DU состоит из одного DC-коэффициента и до 63 AC-коэффициентов. Каждый коэффициент состоит из двух полей: длины поля данных и поля данных. Значение длины закодировано по соответствующей таблице Хаффмана.

Кодирование DC- и AC-коэффициентов осуществляется по-разному. Для кода Хаффмана используются таблицы кодовых слов, описание которых хранится в файле JPEG. Всего может быть использовано до четырех таблиц для кодирования коэффициентов: 1) DC яркостной компоненты; 2) AC яркостной компоненты; 3) DC цветоразностных компонент; 4) AC цветоразностных компонент.

Математическая модель блока данных

При разборе шума декодером важную роль играют области, описывающие размер поля данных каждого коэффициента. Построим вероятностную модель по стандартным таблицам Хаффмана, описывающим DC- и AC-коэффициенты. Будем рассматривать данные как некий неупорядоченный шум, распределенный по нормальному закону. Проанализируем внутреннюю структуру данных, описывающих изображение в оттенках серого.

Коэффициент DC соответствует среднему (яркостному или цветоразностному) значению блока

8×8 , поэтому для соседних блоков он принимает близкие значения. Таким образом, DC сначала подвергается разностному кодированию, потом — кодированию Хаффмана. Для описания серого изображения достаточно использовать только яркостные компоненты.

Коэффициент состоит из двух полей: SIZE и AMPLITUDE, где AMPLITUDE — значение разности с соседним блоком (DIFF), SIZE — размер в битах, который требуется для хранения AMPLITUDE.

При разборе шума мы имеем дело со случайными двоичными данными. Вероятность появления значения в некоем диапазоне будет равна $2^{-\text{SIZE}}$. В зависимости от кода, определяющего поле SIZE, выбирается следующая порция данных, характеризующая значение поля AMPLITUDE.

По стандартной таблице кодов Хаффмана можно легко найти вероятности длин и диапазонов значений DC-коэффициентов. Для более наглядного представления построим таблицу вероятностей для яркостных коэффициентов (табл. 1).

Под ошибкой понимаются все коды, отсутствующие в таблице Хаффмана. В зависимости от программной реализации декодера ошибка может не вызывать краха декодирования, например в случае, когда последний коэффициент всегда разбивается по ветке else алгоритма. Из табл. 1 видно, что вероятности появления большего значения и появления длинных полей уменьшаются.

Исходя из данных табл. 1 построим диаграмму вероятностей размера яркостного DC-коэффициента (рис. 3).

Найдем среднее значение длины яркостных DC-коэффициентов, для них применима формула математического ожидания дискретной случайной величины:

■ Таблица 1. Таблица вероятностей значений яркостных DC-коэффициентов

Категория	Длина кода	Кодовое слово	Вероятность	Значение	Общая длина
0	2	00	0,25	0	2
1	3	010	0,125	-1, 1	4
2	3	011	0,125	-3, -2, 2, 3	5
3	3	100	0,125	-7, ..., -4, 4, ..., 7	6
4	3	101	0,125	-15, ..., -8, 8, ..., 15	7
5	3	110	0,125	-31, ..., -16, 16, ..., 31	8
6	4	1110	0,0625	-63, ..., -32, 32, ..., 63	10
7	5	11110	0,03125	-127, ..., -64, 64, ..., 127	12
8	6	111110	0,015625	-255, ..., -128, 128, ..., 255	14
9	7	1111110	0,0078125	-511, ..., -256, 256, ..., 511	16
10	8	11111110	0,00390625	-1023, ..., -512, 512, ..., 1023	18
11	9	111111110	0,001953125	-2047, ..., -1024, 1024, ..., 2047	20
		Ошибка	0,001953125		

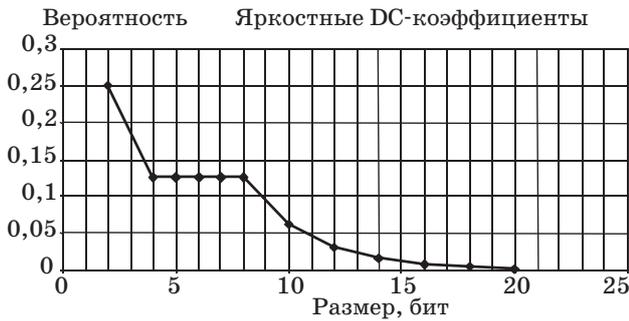


Рис. 3. Распределение вероятностей длины полей

$$M\xi = \sum_{i=1}^n p_i x_i. \quad (1)$$

Подставив из таблицы вероятностей в качестве p вероятности, а в качестве x длины коэффициентов, получим $M_{DCY} = 5,7$ бит.

Таким образом, при интерпретации шума JPEG-декодер будет давать небольшие отклонения средней яркости блоков.

Найдем рассеивание длин DC-коэффициентов. Формула для дисперсии имеет вид

$$D\xi = M(\xi - M\xi)^2. \quad (2)$$

Для дискретной случайной величины получим формулу

$$D\xi = \sum_{i=1}^n (x_i - M\xi)^2 p_i. \quad (3)$$

Суммируя все значения вероятности разностей размеров отдельных коэффициентов и их среднего размера, получаем дисперсию $D_{DCY} = 10,2$.

Аналогичные расчеты, используя соответствующие таблицы Хаффмана, можно провести и для AC-коэффициентов. Всего в стандартной таблице Хаффмана для AC-коэффициентов используется 161 кодовое слово. Из-за их большого числа оценка принимаемых значений очень сильно затруднена, поэтому проведем оценку их размера. Построим сводную таблицу вероятностей размеров яркостных AC-коэффициентов, которые собраны на основе стандартной таблицы. В табл. 2 видно проявление неравномерности используемого кода — преобладающими являются коэффициенты с небольшими короткими длинами.

Вероятность появления кодов с полем более 10 бит очень мала, заметно преобладание коротких кодов. По сводной таблице, используя формулы (1) и (3), можно найти математическое ожидание и дисперсию для одного такого коэффициента: $M_{DCY} = 5,19$, $D_{DCY} = 5,9$.

Стандартом предусмотрена последовательность длиной до 63 таких коэффициентов. Завершающим будет блок EOB (End-of-Block) длиной 4 бита

Таблица 2. Вероятности появления яркостных AC-коэффициентов

Общий размер поля, бит	Сумма вероятностей полей
3	0,25
4	0,3125
5	0,0625
6	0,15625
7	0,0625
8	0,078125
9	0,00390625
10	0,048828125
11	0,004394531
12	0,001464844
13	0,011230469
14	0,000488281
15	0,004150391
16	0,000732422
17	$6,10352 \cdot 10^{-5}$
18	0,001083374
19	0,000183105
20	0,000198364
21	0,000213623
22	0,000228882
23	0,000228882
24	0,000228882
25	0,000244141
26	0,000244141
Ошибка	$1,52588 \cdot 10^{-5}$

и имеющий вероятность появления 0,0625. Всего в последовательности может быть один коэффициент, с увеличением числа AC-коэффициентов вероятность появления EOB будет изменяться следующим образом:

$$\begin{aligned} p_0 &= 0,0625; \\ p_1 &= p_0(1 - p_0); \\ p_2 &= p_0(1 - (p_1 + p_0)); \\ &\dots \end{aligned}$$

Таким образом, получаем общую формулу вероятности отдельно взятого коэффициента

$$p_n = p_0 \left(1 - \sum_{i=0}^{n-1} p_i \right). \quad (4)$$

Приближенно будем считать случайные величины независимыми, найдем среднее значение для 63 коэффициентов. Так как данная случайная величина дискретна, для нее справедлива формула (1), математическое ожидание количества AC-коэффициентов будет $M_{NY} = 13,73$.

Математическое ожидание блока яркостных AC-коэффициентов будет равным сумме математических ожиданий его составляющих:

$$M_{6ACU} = M_{NY}M_{ACU} + EOB = \\ = 13,73 \cdot 5,19 + 4 = 75,2.$$

Проведем расчет полного размера отображаемого блока данных. Средний размер MCU будет равен сумме математических ожиданий составляющих его коэффициентов. Для изображения в оттенках серого это будет один блок данных, представленный яркостными коэффициентами:

$$M_{MCU \text{ серого}} = M_{DCY} + M_{6ACU} = \\ = 5,7 + 75,2 = 80,9 \text{ бит.}$$

В таком режиме MCU будет кодировать блок из 64 пикселей, исходя из этого можно определить «степень сжатия», характеризующую средний объем случайных данных, необходимый для описания одного пикселя. Она будет равной 1,26 бит/пиксель.

Размер файла правильно соотносить с числом и структурой составляющих его блоков. Оценим разброс значений размеров MCU. Найдем дисперсию для блоков изображения как сумму дисперсий всех составляющих MCU:

$$D_{MCU} = D_{DC} + D_{6AC}.$$

Точное количество AC-коэффициентов в блоке неизвестно, поэтому за значение дисперсии блока возьмем сумму среднего числа коэффициентов:

$$D_{6AC} = \sum_{i=1}^N D_{ACi}.$$

Коэффициенты между собой независимы, а дисперсии равны между собой, поэтому эту сумму можно заменить произведением и подставить в общую формулу:

$$D_{MCU} = D_{DC} + N_Y \cdot D_{AC}. \quad (5)$$

В данном случае число N_Y равно математическому ожиданию числа коэффициентов M_{NY} . По формуле (5) рассчитаем дисперсию для серого изображения, она будет представлена только яркостными компонентами:

$$D_{MCU \text{ серого}} = D_{DCY} + N_Y \cdot D_{ACU} = \\ = 10,2 + 13,73 \cdot 5,92 = 91,48.$$

Определим разброс значений размера MCU, найдем среднеквадратичное отклонение для серого и цветного блоков:

$$\sigma = \sqrt{D}; \sigma_{\text{серого}} = \sqrt{91,48} = 9,56.$$

Согласно закону нормального распределения, 99,73 % всех значений будут попадать в диапазон трех среднеквадратичных отклонений в любую

сторону от среднего. Таким образом, разброс объема данных, необходимых для описания одного блока, в случае серого MCU в округленном виде будет составлять (81 ± 29) бит.

Итак, мы вычислили объем данных, необходимый для описания одного блока MCU. По нему можно найти эффективный размер кадра для изображения любого размера.

Экспериментальные данные

Для оценки объема случайных данных, требуемых для заполнения картинки без фоновых полос, были проведены следующие манипуляции с набором изображений. Исследовались файлы изображений в формате JPEG с размером картинки, кратной размеру MCU. Заголовки файлов содержали стандартные таблицы Хаффмана, блок данных после заголовка заменялся случайными данными. Заполнение производилось после блока Start-of-Scan (SOS), обозначенного FFDA. Во избежание сбоя декодера на случайно появившемся маркере, в тексте блоки FF заменялись на FF00. Такая замена вносит погрешность в виде увеличения размера примерно на 0,04 %, однако на число MCU это влияния не оказывает. В конце «шума» ставился маркер EOS. Таким образом, блок, заполненный случайными данными, находится между значениями блока FFDA и маркера FFD9.

Оценка изображения проводилась в несколько этапов:

- 1) вычисление размера блока данных;
- 2) подсчет числа блоков MCU (до начала фона, выдаваемого JPEG-декодером);
- 3) расчет размера MCU при неполном заполнении картинки.

Для оценки размеров MCU изображения, представленного только одной яркостной компонентой, тестовый файл cameraman.bmp (256 × 256 пикселей в оттенках серого) был сохранен в формате JPEG с различным качеством, после чего блок файла, отвечающий за описание картинки, был заменен эквивалентным объемом случайных данных. Результаты сопоставления отображаемых блоков MCU с размером блока данных, полученного заполнением шумом, сведены в табл. 3.

В ходе сравнения были получены средние значения для одного блока от 78 до 91 бита, при этом результаты для заполненных полностью изображений считались избыточными и не учитывались в дальнейшем.

Исходное изображение и картинки, полученные путем записи и отображения порций случайных данных, показаны на рис. 4. Параметр «качество» характеризует JPEG-файл, согласно

■ **Таблица 3.** Экспериментальная оценка среднего размера MCU

Качество	Блок данных, Б	Число MCU	Размер MCU, бит
0	1392	123	91
10	2705	244	89
20	4252	409	83
30	5624	527	85
40	6704	685	78
50	7718	710	87
60	8833	843	84
70	10662	1011	84
80	13455	1024*	105
90	19922	1024*	156
100	48961	1024*	383

* Полное заполнение изображения.

заголовку которого производится отображение шума.

Ошибки, приводящие к краху процесса декодирования, не проявились — на экране отобра-

жался шум. Полученный шум носил блоковый характер, прослеживалась зависимость наполненности картинки от размера файла. Размер MCU серого изображения каждого типа зачастую чуть превышает расчетные 81 бит, но находится в пределах расчетной погрешности.

С увеличением параметра «качество» характер отображаемых картинок меняется — переходы между блоками становятся более плавными. Это связано с тем, что заголовки файлов для хранения изображения заданного качества имеют разные таблицы квантования. Поскольку таблица квантования стандартом не регламентируется, но ее знание необходимо для последующего восстановления изображения, она передается в заголовке выходных данных. Значения в таблице связаны с требуемым качеством изображения, так как в таблице определен шаг значений коэффициентов, данные между которыми будут потеряны. При интерпретации эквивалентного объема шума декодер для изображений низкого качества делает резкие переходы яркости между блоками и внутри них. При высоком качестве переходы между значениями минимальны — это приводит к появлению больших однотонных полос.



cameraman.bmp



Качество 0



Качество 10



Качество 20



Качество 30



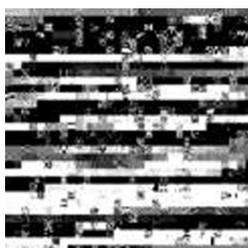
Качество 40



Качество 50



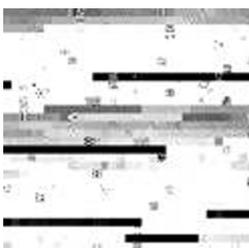
Качество 60



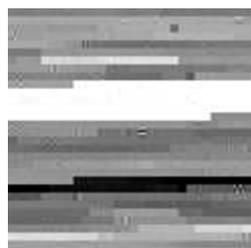
Качество 70



Качество 80



Качество 90



Качество 100

■ **Рис. 4.** Блоковый шум изображения в оттенках серого

Заключение

Рассмотренный в работе подход применим и к оценке защищенных файлов сжатых изображений. Анализ поведения декодера при разборе шума показал, что **JPEG-декодер способен разбирать шум**, при этом искажение изображения в кадре будет блоковым. При разборе шума в теле JPEG-файла кодер способен графически отобразить все данные при условии, что в этих данных нет двухбайтовых блоков, похожих на маркер. Возможно неполное заполнение отображаемой области, при этом уровень заполнения визуализируемой картинке зависит от степени сжатия изображения. Стандарт не предусматривает фиксацию размера выходного файла, и такого рода информацию можно использовать для анализа последовательностей изображений.

Системы видеонаблюдения, использующие в своей основе **JPEG-сжатие, уязвимы для статистического анализа битовой скорости**. Особенности работы алгоритма сжатия по удалению избыточности того или иного рода приводят к появлению вторичных данных. Их наличие и знание основных особенностей алгоритма делает систему уязвимой.

Для сокрытия скорости передачи рекомендуется передавать данные равными порциями в любой момент времени, независимо от достижимой степени компрессии при любых качественных

характеристиках изображений. Данные о размере блока можно использовать для маскирования вторичной информации в файле — это позволяет сместить вверх нижнюю границу размера кадра. Качественные характеристики изображения и параметры сжатия кодером влияют на размер конечного файла. Однако эти параметры не оказывают никакого влияния на объем данных, требуемых для заполнения выводимой картинке блоковым шумом. Анализ вторичной информации возможен как по битовой скорости потока, так и по размеру отображаемой части изображений. Информацию о размере блока можно использовать для маскирования незаполненных частей визуализируемой картинке.

Литература

1. Санкин П. С., Литвинов М. Ю. Особенности оценки содержимого сжатого видеопотока // Информационно-управляющие системы. 2009. № 3. С. 45–48.
2. CCITT Rec. T.81 (1992 E) | ISO/IEC 10918-1: 1993(E). Information technology — Digital compression and coding of continuous-tone still images: Requirements and guidelines. <http://www.w3.org/Graphics/JPEG/itu-t81.pdf> (дата обращения: 20.08.2008)

УДК 621.39

ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ КОГЕРЕНТНОГО ПРИЕМА МНОГОПОЗИЦИОННЫХ СИГНАЛОВ КАМ И ФМ ПРИ НЕИДЕАЛЬНОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ

Н. В. Савищенко,
доктор техн. наук, профессор
Военная академия связи

Дается оценка потерь в мощности и помехоустойчивости когерентного приема сигналов при наличии ошибки в определении фазы несущей. Рассматриваются двумерные многопозиционные сигналы.

Ключевые слова — помехоустойчивость, когерентный прием, неидеальная синхронизация, многопозиционные сигналы КАМ и ФМ.

Введение

При использовании когерентного приема сигналов подразумевается, что отсутствует фазовая ошибка в контуре фазовой автоподстройки частоты, т. е. передатчик и приемник синхронизированы по частоте и фазе. На практике может возникнуть такая ситуация, что генератор, который формирует несущую для демодуляции в приемнике, не синхронизирован с фазой передатчика. Можно подчеркнуть важность получения точной оценки фазы, рассмотрев влияние фазовой ошибки на помехоустойчивость когерентного приема сигналов. Характер зависимости вероятности ошибки от погрешности в определении фазы несущей чаще всего является нетривиальным и трудно анализируемым без отсутствия точных соотношений, справедливых во всем диапазоне изменения параметров. В данной статье показано, что зависимость вероятности ошибки от фазовой ошибки носит существенно нелинейный характер и, начиная с некоторого порогового значения, дальнейшее увеличение отношения сигнал/шум не приводит к повышению помехоустойчивости. Таким образом, имеется своеобразный эффект энергетического насыщения, после которого уже нецелесообразно дальнейшее повышение энергетики.

Математическая модель канала связи и обозначения приведены в работе [1]. Представленные здесь результаты являются дальнейшим обобщением и развитием результатов, отраженных в статье [1], применительно к многопозици-

онным сигналам: многопозиционной фазовой манипуляции (ФМ-М, *Multiple Phase Shift Keying — MPSK*) и квадратурной амплитудной манипуляции (КАМ-М, *Quadrature Amplitude Modulation — M-QAM*).

Анализ вероятности ошибки когерентного приема сигналов КАМ-4 (QPSK)

Битовая вероятность ошибки в первом бите для 4-позиционной квадратурной манипуляции (КАМ-4, *Quadrature Phase Shift Keying — QPSK*) при $\varphi \in [-\pi, \pi]$ будет определяться

$$P_{b1}(h_{bc}^2, \varphi) = \frac{1}{2} \left[Q \left(2 \cos \left(\varphi + \frac{\pi}{4} \right) \sqrt{h_{bc}^2} \right) + Q \left(2 \cos \left(\varphi - \frac{\pi}{4} \right) \sqrt{h_{bc}^2} \right) \right] \quad (1a)$$

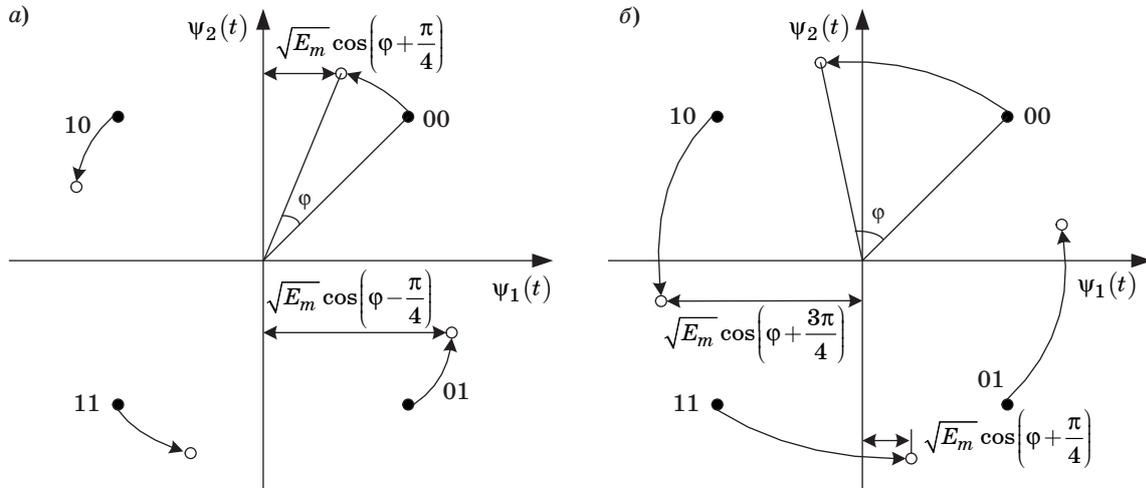
и во втором бите

$$P_{b2}(h_{bc}^2, \varphi) = \frac{1}{2} \left[Q \left(2 \sin \left(\varphi + \frac{\pi}{4} \right) \sqrt{h_{bc}^2} \right) + Q \left(-2 \sin \left(\varphi - \frac{\pi}{4} \right) \sqrt{h_{bc}^2} \right) \right] \quad (1b)$$

Используя простейшие тригонометрические преобразования, можно показать, что битовые вероятности ошибки равны:

$$P_{b1}(h_{bc}^2, \varphi) = P_{b2}(h_{bc}^2, \varphi).$$

Два варианта поворота сигнальных точек и расстояния от них до границ областей принятия решения в зависимости от фиксированного угла фазовой ошибки φ показаны на рисунке, а, б.



■ Смещение сигнальных точек при фазовой ошибке: а — $\varphi \in [0, \pi/4]$; б — $\varphi \in [\pi/4, \pi/2]$ и соответствующие расстояния до границ областей принятия решения

Канал связи без замираний и с фазовой ошибкой. Рассматривая (1а), получаем, что в канале связи с фазовой ошибкой

$$P_{b1,2}(h_{bc}^2, \rho) = \frac{1}{2} \int_{-\pi}^{\pi} \left[Q \left(2 \cos \left(\varphi + \frac{\pi}{4} \right) \sqrt{h_{bc}^2} \right) + Q \left(2 \cos \left(\varphi - \frac{\pi}{4} \right) \sqrt{h_{bc}^2} \right) \right] \times \omega(\varphi) d\varphi.$$

После несложных преобразований приходим к соотношению

$$P_{b1,2}(h_{bc}^2, \rho) = \int_0^{\pi/2} \omega \left(\varphi + \frac{\pi}{2} \right) d\varphi + \int_0^{\pi/2} \left\{ \left[\omega(\varphi) + \omega \left(\varphi + \frac{\pi}{2} \right) \right] Q \left(2 \cos \left(\varphi + \frac{\pi}{4} \right) \sqrt{h_{bc}^2} \right) + \left[\omega(\varphi) - \omega \left(\varphi + \frac{\pi}{2} \right) \right] Q \left(2 \cos \left(\varphi - \frac{\pi}{4} \right) \sqrt{h_{bc}^2} \right) \right\} d\varphi. \quad (2a)$$

При значениях $\rho \gg 1$ и $\varphi \in [0, \pi]$ $\omega \left(\varphi + \frac{\pi}{2} \right) \cong 0$,

поэтому при численных расчетах второй интеграл можно упростить и использовать приближенную формулу

$$P_{b1,2}(h_{bc}^2, \rho) \cong \frac{1}{2} G_{BPSK}(\rho) + \int_0^{\pi/2} \left[Q \left(2 \cos \left(\varphi + \frac{\pi}{4} \right) \sqrt{h_{bc}^2} \right) + Q \left(2 \cos \left(\varphi - \frac{\pi}{4} \right) \sqrt{h_{bc}^2} \right) \right] \times \omega(\varphi) d\varphi.$$

Дальнейшие преобразования (2а) приводят к соотношению

$$P_{b1,2}(h_{bc}^2, \rho) = G_{QPSK}^b(\rho) + \int_0^{\pi/4} U(\varphi, \rho) Q \left(2 \sin \varphi \sqrt{h_{bc}^2} \right) + V(\varphi, \rho) Q \left(2 \cos \varphi \sqrt{h_{bc}^2} \right) d\varphi, \quad (2б)$$

где

$$G_{QPSK}^b(\rho) = \int_0^{\pi/4} \left\{ \omega \left(\varphi - \frac{3\pi}{4} \right) + \omega \left(\varphi + \frac{\pi}{4} \right) + 2\omega \left(\varphi + \frac{3\pi}{4} \right) \right\} d\varphi;$$

$$G_{QPSK}^b(0) = \frac{1}{2};$$

$$U(\varphi, \rho) = \omega \left(\varphi - \frac{3\pi}{4} \right) + \omega \left(\varphi - \frac{\pi}{4} \right) - \omega \left(\varphi + \frac{\pi}{4} \right) - \omega \left(\varphi + \frac{3\pi}{4} \right) =$$

$$= \sum_{r=0}^{M-1} \text{wal} \left(1, \frac{2r-3}{8} \right) \omega \left(\varphi + \frac{\pi}{4} (2r-3) \right);$$

$$V(\varphi, \rho) = -\omega \left(\varphi - \frac{3\pi}{4} \right) + \omega \left(\varphi - \frac{\pi}{4} \right) + \omega \left(\varphi + \frac{\pi}{4} \right) - \omega \left(\varphi + \frac{3\pi}{4} \right) =$$

$$= -\sum_{r=0}^{M-1} \text{wal} \left(2, \frac{2r-3}{8} \right) \omega \left(\varphi + \frac{\pi}{4} (2r-3) \right),$$

где $M = 4$ и $\text{wal}(p, \theta)$, $\theta \in [-0,5; 0,5]$ — функции Уолша, упорядоченные по Уолшу. В частности, из (2б) следует, что функция $P_{b1}(h_{bc}^2, \rho)$ является убывающей по аргументу h_{bc}^2 , $\lim_{h_{bc}^2 \rightarrow \infty} P_{b1,2}(h_{bc}^2, \rho) =$

$= G_{QPSK}^b(\rho)$, и, следовательно, для всех отношений сигнал/шум h_{bc}^2 будет выполняться неравенство $P_{b1,2}(h_{bc}^2, \rho) \geq G_{QPSK}^b(\rho)$, т. е. существует нижняя граница вероятности ошибки, которая не может быть достигнута. Используя свойство четности плотности распределения Тихонова и замену переменных в интеграле, можно $G_{QPSK}^b(\rho)$ переписать:

$$G_{QPSK}^b(\rho) = \frac{1}{2} - \int_0^{\pi/4} \left\{ \omega\left(\varphi - \frac{\pi}{4}\right) - \omega\left(\varphi + \frac{3\pi}{4}\right) \right\} d\varphi.$$

Выражение (2б) можно записать в виде

$$P_{b1,2}(h_{bc}^2, \rho) = G_{QPSK}^b(\rho) + \int_0^{\pi/4} \left[\sum_{r=0}^{M-1} \text{wal}\left(1, \frac{2r-3}{8}\right) Q\left(2\sin\varphi\sqrt{h_{bc}^2}\right) - \text{wal}\left(2, \frac{2r-3}{8}\right) Q\left(2\cos\varphi\sqrt{h_{bc}^2}\right) \right] \times \omega\left(\varphi + \frac{\pi}{4}(2r-3)\right) d\varphi. \quad (2в)$$

Рассмотрим предельные случаи. При $\rho \rightarrow \infty$ $\omega(\varphi - \varphi_0) = \delta(\varphi - \varphi_0)$, поэтому

$$\lim_{\rho \rightarrow \infty} G_{QPSK}^b(\rho) = \int_0^{\pi/4} \left\{ \delta\left(\varphi - \frac{3\pi}{4}\right) + \delta\left(\varphi + \frac{\pi}{4}\right) + 2\delta\left(\varphi + \frac{3\pi}{4}\right) \right\} d\varphi = 0$$

и $P_{b1,2}(h_{bc}^2) = \lim_{\rho \rightarrow \infty} P_{b1,2}(h_{bc}^2, \rho) = Q\left(\sqrt{2h_{bc}^2}\right)$, что со-

впадает с формулой, приведенной в работах [2, 3]. Если $\rho = 0$, то $P_{b1,2}(h_{bc}^2, 0) = G_{QPSK}^b(0) = 0,5$. Эта же величина получается при обрыве канала связи ($h_{bc}^2 \rightarrow 0$) и идеальном когерентном приеме, т. е. $P_{b1,2}(0) = \lim_{\rho \rightarrow \infty} P_{b1,2}(0, \rho) = 0,5$. При наличии равно-

мерно распределенной фазовой ошибки ($\rho = 0$) и обрыве канала связи ($h_{bc}^2 \rightarrow 0$) вероятность ошибки также равна $P_{b1,2}(0, 0) = \lim_{h_{bc}^2 \rightarrow 0} P_{b1,2}(h_{bc}^2, 0) = 0,5$,

так как $U(\varphi, 0) = V(\varphi, 0) = 0$. Если $\rho \neq 0$ и $h_{bc}^2 \rightarrow 0$, то значение ошибки остается тем же:

$$P_{b1,2}(0, \rho) = \lim_{h_{bc}^2 \rightarrow 0} P_{b1,2}(h_{bc}^2, \rho) = \int_0^{\pi/4} \left\{ \omega\left(\varphi - \frac{3\pi}{4}\right) + \omega\left(\varphi - \frac{\pi}{4}\right) + \omega\left(\varphi + \frac{\pi}{4}\right) + \omega\left(\varphi + \frac{3\pi}{4}\right) \right\} d\varphi = \frac{1}{2}.$$

Символьная вероятность ошибки определяется по формуле

$$P_e(h_{bc}^2, \varphi) = Q\left(2\sin\left(\varphi + \frac{\pi}{4}\right)\sqrt{h_{bc}^2}\right) + Q\left(2\cos\left(\varphi + \frac{\pi}{4}\right)\sqrt{h_{bc}^2}\right) - Q\left(2\sin\left(\varphi + \frac{\pi}{4}\right)\sqrt{h_{bc}^2}\right) Q\left(2\cos\left(\varphi + \frac{\pi}{4}\right)\sqrt{h_{bc}^2}\right). \quad (3)$$

Из этой формулы следует, что при отсутствии фазовой ошибки, т. е. при $\varphi = 0$, $P_e = 2Q\left(\sqrt{2h_{bc}^2}\right) - Q^2\left(\sqrt{2h_{bc}^2}\right)$. Если, например, $\varphi = \pi/4$, то

$$P_e = \frac{1}{2} \left[1 + Q\left(2\sqrt{h_{bc}^2}\right) \right].$$

Таким образом, при фиксированных значениях ошибки можно использовать соотношение (3). Если предположить, что фазовая ошибка является случайной величиной, то средняя вероятность ошибки может быть найдена при использовании (2). Для усреднения (3) по распределению Тихонова преобразуем формулу к виду

$$P_e(h_{bc}^2, \varphi) = Q\left(2\cos\left(\varphi - \frac{\pi}{4}\right)\sqrt{h_{bc}^2}\right) + Q\left(2\cos\left(\varphi + \frac{\pi}{4}\right)\sqrt{h_{bc}^2}\right) - Q\left(2\cos\left(\varphi - \frac{\pi}{4}\right)\sqrt{h_{bc}^2}\right) Q\left(2\cos\left(\varphi + \frac{\pi}{4}\right)\sqrt{h_{bc}^2}\right). \quad (4)$$

Анализируя (4), видим, что усреднение первых двух слагаемых с точностью до множителя совпадает с (2), поэтому рассмотрим третье слагаемое отдельно:

$$R(h_{bc}^2, \rho) = \int_{-\pi}^{\pi} Q\left(2\cos\left(\varphi - \frac{\pi}{4}\right)\sqrt{h_{bc}^2}\right) \times Q\left(2\cos\left(\varphi + \frac{\pi}{4}\right)\sqrt{h_{bc}^2}\right) \omega(\varphi) d\varphi.$$

Используя простейшие преобразования, получаем, что

$$R(h_{bc}^2, \rho) = 2 \int_0^{\pi/4} \omega\left(\varphi + \frac{3\pi}{4}\right) d\varphi + 2 \int_0^{\pi/4} \left[\omega\left(\varphi - \frac{3\pi}{4}\right) - \omega\left(\varphi + \frac{3\pi}{4}\right) \right] Q\left(2\sin\varphi\sqrt{h_{bc}^2}\right) d\varphi + 2 \int_0^{\pi/4} \left[\omega\left(\varphi + \frac{\pi}{4}\right) - \omega\left(\varphi + \frac{3\pi}{4}\right) \right] Q\left(2\cos\varphi\sqrt{h_{bc}^2}\right) d\varphi + 2 \int_0^{\pi/4} \left[-\omega\left(\varphi - \frac{3\pi}{4}\right) + \omega\left(\varphi - \frac{\pi}{4}\right) - \omega\left(\varphi + \frac{\pi}{4}\right) + \omega\left(\varphi + \frac{3\pi}{4}\right) \right] \times Q\left(2\sin\varphi\sqrt{h_{bc}^2}\right) Q\left(2\cos\varphi\sqrt{h_{bc}^2}\right) d\varphi.$$

Следовательно:

$$P_e(h_{bc}^2, \rho) = G_{QPSK}^e(\rho) + 2 \int_0^{\pi/4} \left[X(\varphi, \rho) Q\left(2 \sin \varphi \sqrt{h_{bc}^2}\right) + Y(\varphi, \rho) Q\left(2 \cos \varphi \sqrt{h_{bc}^2}\right) + Z(\varphi, \rho) Q\left(2 \sin \varphi \sqrt{h_{bc}^2}\right) Q\left(2 \cos \varphi \sqrt{h_{bc}^2}\right) \right] d\varphi, \quad (5)$$

где

$$G_{QPSK}^e(\rho) = 2 \int_0^{\pi/4} \left[\omega\left(\varphi - \frac{3\pi}{4}\right) + \omega\left(\varphi + \frac{\pi}{4}\right) + \omega\left(\varphi + \frac{3\pi}{4}\right) \right] d\varphi;$$

$$X(\varphi, \rho) = \omega\left(\varphi - \frac{\pi}{4}\right) - \omega\left(\varphi + \frac{\pi}{4}\right);$$

$$Y(\varphi, \rho) = \omega\left(\varphi - \frac{\pi}{4}\right) - \omega\left(\varphi - \frac{3\pi}{4}\right);$$

$$Z(\varphi, \rho) = \omega\left(\varphi - \frac{3\pi}{4}\right) - \omega\left(\varphi - \frac{\pi}{4}\right) + \omega\left(\varphi + \frac{\pi}{4}\right) - \omega\left(\varphi + \frac{3\pi}{4}\right) = \sum_{r=0}^{M-1} \text{wal}\left(3, \frac{2r-3}{8}\right) \omega\left(\varphi + \frac{\pi}{4}(2r-3)\right).$$

Очевидно, что

$$G_{QPSK}^e(\rho) = 1 - 2 \int_0^{\pi/4} \omega\left(\varphi - \frac{\pi}{4}\right) d\varphi = 1 - 2 \int_0^{\pi/4} \omega(\varphi) d\varphi.$$

В частности, $G_{QPSK}^e(0) = \frac{3}{4}$, $\lim_{\rho \rightarrow \infty} G_{QPSK}^e(\rho) = 0$. Кроме того:

$$P_e(h_{bc}^2) = \lim_{\rho \rightarrow \infty} P_e(h_{bc}^2, \rho) = 2Q\left(\sqrt{2h_{bc}^2}\right) - Q^2\left(\sqrt{2h_{bc}^2}\right),$$

что совпадает с формулой, полученной при идеальном когерентном приеме [2, 3]. При $\rho = 0$ $P_e(h_{bc}^2, 0) = G_{QPSK}^e(0) = \frac{3}{4}$, так как $X(\varphi, 0) = Y(\varphi, 0) = Z(\varphi, 0) = 0$. При произвольной величине ρ и обрыве канала связи ($h_{bc}^2 \rightarrow 0$) значение вероятности ошибки

$$P_e(0, \rho) = \lim_{h_{bc}^2 \rightarrow 0} P_e(h_{bc}^2, \rho) = G_{QPSK}^e(\rho) + \int_0^{\pi/4} \left[X(\varphi, \rho) + Y(\varphi, \rho) + \frac{1}{2} Z(\varphi, \rho) \right] d\varphi$$

или снова

$$P_e(0, \rho) = \frac{3}{2} \int_0^{\pi/4} \left[\omega\left(\varphi - \frac{3\pi}{4}\right) + \omega\left(\varphi - \frac{\pi}{4}\right) + \omega\left(\varphi + \frac{\pi}{4}\right) + \omega\left(\varphi + \frac{3\pi}{4}\right) \right] d\varphi = \frac{3}{4}.$$

Если $h_{bc}^2 \rightarrow \infty$, то $\lim_{h_{bc}^2 \rightarrow \infty} P_e(h_{bc}^2, \rho) = G_{QPSK}^e(\rho)$

и, следовательно, для всех отношений сигнал/шум h_{bc}^2 будет выполняться неравенство $P_e(h_{bc}^2, \rho) \geq G_{QPSK}^e(\rho)$, т. е. снова существует нижняя граница вероятности ошибки, которая не может быть достигнута при $\rho > 0$.

Канал связи с замираниями и с фазовой ошибкой. Для битовой вероятности ошибки формулы в канале связи с замираниями могут быть легко получены, если усреднять (2б). Например, для замираний Райса—Накагами

$$\tilde{P}_{b1,2}(h_{bc}^2, \rho) = G_{QPSK}^b(\rho) + 2 \int_0^{\pi/4} \left[U(\varphi, \rho) \mathcal{H}_p\left(z_s[h_{bc}^2, \varphi], b_s[h_{bc}^2, \varphi], +\infty\right) + V(\varphi, \rho) \mathcal{H}_p\left(z_c[h_{bc}^2, \varphi], b_c[h_{bc}^2, \varphi], +\infty\right) \right] d\varphi,$$

где

$$z_{s,c}[h_{bc}^2, \varphi] = \frac{\gamma}{\sqrt{\beta}} b_{s,c}[h_{bc}^2, \varphi];$$

$$b_s[h_{bc}^2, \varphi] = \sqrt{\frac{4h_{bc}^2 \sin^2 \varphi}{4h_{bc}^2 \sin^2 \varphi + m_2 \beta}};$$

$$b_c[h_{bc}^2, \varphi] = \sqrt{\frac{4h_{bc}^2 \cos^2 \varphi}{4h_{bc}^2 \cos^2 \varphi + m_2 \beta}}.$$

При $\rho \rightarrow \infty$

$$\tilde{P}_{b1,2}(h_{bc}^2) = \lim_{\rho \rightarrow \infty} \tilde{P}_{b1,2}(h_{bc}^2, \rho) = 2 \mathcal{H}_p\left(z[h_{bc}^2], b[h_{bc}^2], +\infty\right),$$

где

$$z[h_{bc}^2] = \frac{\gamma}{\sqrt{\beta}} b[h_{bc}^2];$$

$$b[h_{bc}^2] = \sqrt{\frac{2h_{bc}^2}{2h_{bc}^2 + m_2 \beta}}.$$

Несколько более сложная ситуация возникает при использовании (5) для получения аналогичных формул вероятности ошибок в канале с замираниями Райса—Накагами или четырехпараметрическими замираниями. Основная сложность заключается в том, что дополнительно необходимо усреднить произведение функций Гаусса. Так как получение общей формулы в этом случае не представляет сложности, ограничимся лишь записью усреднения произведения функций Гаусса. Например, для замираний Райса—Накагами

$$\int_0^{\infty} Q(\alpha\mu)Q(\theta\mu)\omega(\mu)d\mu = \\ = \mathcal{H}_p \left(z_s [h_{bc}^2, \varphi], b_s [h_{bc}^2, \varphi], \left[\begin{matrix} +\infty \\ \text{ctg}\varphi \end{matrix} \right] \right) + \\ + \mathcal{H}_p \left(z_c [h_{bc}^2, \varphi], b_c [h_{bc}^2, \varphi], \left[\begin{matrix} +\infty \\ \text{tg}\varphi \end{matrix} \right] \right),$$

где $\alpha = 2\sin\varphi\sqrt{\frac{h_{bc}^2}{m_2}}$; $\theta = 2\cos\varphi\sqrt{\frac{h_{bc}^2}{m_2}}$;

$$z_{s,c} [h_{bc}^2, \varphi] = \frac{\gamma}{\sqrt{\beta}} b_{s,c} [h_{bc}^2, \varphi];$$

$$b_s [h_{bc}^2, \varphi] = \sqrt{\frac{4h_{bc}^2 \sin^2 \varphi}{4h_{bc}^2 \sin^2 \varphi + m_2\beta}};$$

$$b_c [h_{bc}^2, \varphi] = \sqrt{\frac{4h_{bc}^2 \cos^2 \varphi}{4h_{bc}^2 \cos^2 \varphi + m_2\beta}}.$$

Анализ вероятности ошибки когерентного приема сигналов ФМ-М (MPSK)

Битовая вероятность ошибки при фиксированной фазовой ошибке в первом и втором битах для ФМ-М, $M=2^k$ определяется по формулам

$$P_{b1}(h_{bc}^2, \varphi) = \frac{2}{M} \sum_{k=1}^{M/4} \left[Q \left(\cos(\alpha_k + \varphi) \sqrt{2h_c^2} \right) + \right. \\ \left. + Q \left(\cos(\alpha_k - \varphi) \sqrt{2h_c^2} \right) \right], \varphi \in [-\pi, \pi]; \quad (6a)$$

$$P_{b2}(h_{bc}^2, \varphi) = \frac{2}{M} \sum_{k=1}^{M/4} \left[Q \left(\sin(\alpha_k + \varphi) \sqrt{2h_c^2} \right) + \right. \\ \left. + Q \left(\sin(\alpha_k - \varphi) \sqrt{2h_c^2} \right) \right], \varphi \in [-\pi, \pi], \quad (6б)$$

где $h_c^2 = h_{bc}^2 \log_2 M$; $\alpha_k = (2k-1)\frac{\pi}{M}$, $0 < \alpha_k < \frac{\pi}{2}$, $k = \overline{1, M/4}$.

Покажем, что при таком выборе $\alpha_k = (2k-1)\frac{\pi}{M}$, $k = \overline{1, M/4}$ битовые вероятности ошибок в первом и втором битах совпадают: $P_{b1}(h_{bc}^2, \varphi) = P_{b2}(h_{bc}^2, \varphi)$. Действительно, для произвольной функции $f(*)$ справедливо соотношение

$$\sum_{k=1}^K f(h \cos(\alpha_k \pm \varphi)) = \sum_{k=1}^K f \left(h \sin \left(\frac{\pi}{2} - \alpha_k \mp \varphi \right) \right) = \\ = \sum_{k=1}^K f(h \sin(\alpha_{K-k+1} \mp \varphi)) = \sum_{k=1}^K f(h \sin(\alpha_k \mp \varphi)),$$

которое выполняется, если $\alpha_{K-k+1} + \alpha_k = \pi/2$, для любых $k = \overline{1, K}$. Последняя формула справедлива,

если $2K\pi/M = \pi/2$, т. е. при $K = M/4$. Таким образом, при проведении дальнейших расчетов можно ограничиться использованием либо (6а), либо (6б). Рассмотрим оба варианта, чтобы в дальнейшем их можно было использовать для численных расчетов и контроля результатов.

Путем простейших преобразований усреднение (6а) по распределению Тихонова может быть приведено к виду

$$P_{b1,2}(h_{bc}^2, \rho) = \frac{4}{M} \sum_{k=1}^{M/4} \left[\int_0^{\pi} Q \left(\cos(\varphi + \alpha_k) \sqrt{2h_c^2} \right) + \right. \\ \left. + Q \left(\cos(\varphi - \alpha_k) \sqrt{2h_c^2} \right) \right] \omega(\varphi) d\varphi$$

или

$$P_{b1,2}(h_{bc}^2, \rho) = \\ = \frac{4}{M} \sum_{k=1}^{M/4} \left[\int_{\alpha_k}^{\pi+\alpha_k} Q \left(\cos\varphi \sqrt{2h_c^2} \right) \omega(\varphi - \alpha_k) d\varphi - \right. \\ \left. - \int_{\alpha_k}^{-\pi+\alpha_k} Q \left(\cos\varphi \sqrt{2h_c^2} \right) \omega(\varphi - \alpha_k) d\varphi \right], \\ P_{b1,2}(h_{bc}^2, \rho) = \\ = \frac{4}{M} \sum_{k=1}^{M/4} \left[\int_{-\pi+\alpha_k}^{\pi+\alpha_k} Q \left(\cos\varphi \sqrt{2h_c^2} \right) \omega(\varphi - \alpha_k) d\varphi \right]. \quad (7)$$

Используя приложение 1, можно переписать (7) в виде

$$P_{b1,2}(h_{bc}^2, \rho) = G_{MPSK}^b(\rho, M) + \\ + \int_0^{\pi/2} Q \left(\cos\varphi \sqrt{2h_c^2} \right) U_M(\varphi, \rho, M) d\varphi, \quad (8a)$$

где

$$G_{MPSK}^b(\rho, M) = \\ = \frac{4}{M} \sum_{k=1}^{M/4} \left[\int_{\alpha_k}^{\pi/2} \omega(\varphi - \alpha_k - \pi) d\varphi + \int_{-\alpha_k}^{\pi/2} \omega(\varphi + \alpha_k - \pi) d\varphi \right] = \\ = \frac{4}{M} \sum_{k=1}^{M/4} \left[\int_{-\pi/2}^{\pi/2} \omega(\varphi - \alpha_k \pm \pi) d\varphi \right] = \\ = \frac{4}{M} \sum_{k=1}^{M/4} \left[\int_0^{\pi/2} [\omega(\varphi - \alpha_k \pm \pi) + \omega(\varphi + \alpha_k \pm \pi)] d\varphi \right]; \\ U_M(\varphi, \rho, M) = \frac{4}{M} \sum_{k=1}^{M/4} [\omega(\varphi + \alpha_k) + \\ + \omega(\varphi - \alpha_k) - \omega(\varphi - \alpha_k - \pi) - \omega(\varphi + \alpha_k - \pi)].$$

Рассмотрим предельные случаи. При $\rho \rightarrow \infty$ $\omega(\varphi - \varphi_0) = \delta(\varphi - \varphi_0)$, поэтому

$$\lim_{\rho \rightarrow \infty} G_{MPSK}^b(\rho, M) = \frac{4}{M} \sum_{k=1}^{M/4} \left[\int_{\alpha_k}^{\pi/2} \delta(\varphi - \alpha_k - \pi) d\varphi + \int_{-\alpha_k}^{\pi/2} \delta(\varphi + \alpha_k - \pi) d\varphi \right] = 0,$$

так как для любого $k = \overline{1, M/4}$ $\alpha_k + \pi \notin [\alpha_k, \pi/2]$ и $-\alpha_k + \pi \notin [-\alpha_k, \pi/2]$. Отсюда следует, что

$$P_{b1,2}(h_{bc}^2) = \lim_{\rho \rightarrow \infty} P_{b1,2}(h_{bc}^2, \rho) = \frac{4}{M} \sum_{k=1}^{M/4} Q \left(\cos \alpha_k \sqrt{2h_c^2} \right),$$

так как $\alpha_k \in [0, \pi/2]$. Эта формула совпадает с формулой, полученной для вероятности битовой ошибки при идеальном когерентном приеме сигналов ФМ-М [4]. При обрыве канала связи ($h_{bc}^2 \rightarrow 0$) и идеальном когерентном приеме получаем $P_{b1,2}(0) = \lim_{\rho \rightarrow \infty} P_{b1,2}(0, \rho) = 0,5$.

Если $\rho = 0$, то $P_{b1,2}(h_{bc}^2, 0) = G_{MPSK}^b(\rho, M) = 0,5$ для любых отношений сигнал/шум h_{bc}^2 , так как $U_M(\varphi, 0, M) = 0$. При обрыве канала связи ($h_{bc}^2 \rightarrow 0$) и произвольных значениях ρ вероятность ошибки $P_{b1,2}(0, \rho) = \lim_{h_{bc}^2 \rightarrow 0} P_{b1,2}(h_{bc}^2, \rho) = 0,5$.

Если $h_{bc}^2 \rightarrow \infty$, то $\lim_{h_{bc}^2 \rightarrow \infty} P_{b1,2}(h_{bc}^2, \rho) = G_{MPSK}^b(\rho, M)$

и для всех отношений сигнал/шум h_{bc}^2 будет выполняться неравенство $P_{b1,2}(h_{bc}^2, \rho) \geq G_{MPSK}^b(\rho, M)$, т. е. существует нижняя граница вероятности ошибки, которая не может быть достигнута при конечных значениях $\rho > 0$.

Соответственно, используя приложение 1 для (6б), получаем другую форму записи битовой вероятности ошибки

$$P_{b1,2}(h_{bc}^2, \rho) = G_{MPSK}^{b*}(\rho, M) + \int_0^\pi Q \left(\sin \varphi \sqrt{2h_c^2} \right) V_M(\varphi, \rho, M) d\varphi, \quad (8б)$$

где

$$G_{MPSK}^{b*}(\rho, M) = \frac{4}{M} \int_0^\pi \left[\sum_{k=1}^{M/4} \omega(\varphi + \alpha_k) \right] d\varphi;$$

$$V_M(\varphi, \rho, M) = \frac{4}{M} \sum_{k=1}^{M/4} [\omega(\varphi - \alpha_k) - \omega(\varphi + \alpha_k)].$$

Предельные случаи рассматриваются аналогично предыдущему варианту и приводят к тем же результатам.

Символьная вероятность ошибки когерентного приема сигналов ФМ-М. Сложность получения формулы для вычисления символьной вероятности ошибки когерентного приема сигналов ФМ-М

в данном случае связана с тем, что существует пять вариантов взаимного расположения сигнальной точки, повернутой на угол φ , и области оптимального принятия решения. Учитывая симметричность расположения сигнальных точек, ограничимся рассмотрением интервала $\varphi \in [0, \pi]$. Введем следующие обозначения:

$$u_M^\varphi = \sin \left(\varphi - \frac{\pi}{M} \right), \quad v_M^\varphi = \sin \left(\varphi + \frac{\pi}{M} \right),$$

$$b_M^\varphi = \text{ctg} \left(\varphi - \frac{\pi}{M} \right), \quad a_M^\varphi = \text{ctg} \left(\varphi + \frac{\pi}{M} \right).$$

Тогда

$$P_{MPSK}^e(h_{bc}^2, \varphi) = \left[\frac{1}{2} \left[Q \left(-\sqrt{2h_c^2} u_M^\varphi \right) + Q \left(\sqrt{2h_c^2} v_M^\varphi \right) \right] + T \left(\sqrt{2h_c^2} u_M^\varphi, -b_M^\varphi \right) + T \left(\sqrt{2h_c^2} v_M^\varphi, a_M^\varphi \right) \right],$$

$$\varphi \in \left[0, \frac{\pi}{M} \right];$$

$$1 - \frac{1}{2} \left[Q \left(\sqrt{2h_c^2} u_M^\varphi \right) - Q \left(\sqrt{2h_c^2} v_M^\varphi \right) \right] - \left[T \left(\sqrt{2h_c^2} u_M^\varphi, b_M^\varphi \right) - T \left(\sqrt{2h_c^2} v_M^\varphi, a_M^\varphi \right) \right],$$

$$\varphi \in \left[\frac{\pi}{M}, \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{M} \right];$$

$$1 - \frac{1}{2} \left[Q \left(\sqrt{2h_c^2} u_M^\varphi \right) - Q \left(\sqrt{2h_c^2} u_M^{\pi-\varphi} \right) \right] - \left[T \left(\sqrt{2h_c^2} u_M^\varphi, b_M^\varphi \right) + T \left(\sqrt{2h_c^2} u_M^{\pi-\varphi}, b_M^{\pi-\varphi} \right) \right],$$

$$\varphi \in \left[\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{M}, \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{M} \right];$$

$$1 - \frac{1}{2} \left[Q \left(\sqrt{2h_c^2} v_M^{\pi-\varphi} \right) - Q \left(\sqrt{2h_c^2} u_M^{\pi-\varphi} \right) \right] - \left[T \left(\sqrt{2h_c^2} u_M^{\pi-\varphi}, b_M^{\pi-\varphi} \right) - T \left(\sqrt{2h_c^2} v_M^{\pi-\varphi}, a_M^{\pi-\varphi} \right) \right],$$

$$\varphi \in \left[\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{M}, \pi - \frac{\pi}{M} \right];$$

$$1 - \frac{1}{2} \left[Q \left(\sqrt{2h_c^2} v_M^{\varphi-\pi} \right) + Q \left(\sqrt{2h_c^2} v_M^{\pi-\varphi} \right) \right] + \left[T \left(\sqrt{2h_c^2} v_M^{\varphi-\pi}, a_M^{\varphi-\pi} \right) + T \left(\sqrt{2h_c^2} v_M^{\pi-\varphi}, a_M^{\pi-\varphi} \right) \right],$$

$$\varphi \in \left[\pi - \frac{\pi}{M}, \pi \right].$$

Учитывая, что

$$\begin{aligned} u_M^{\pi-\varphi} &= v_M^\varphi, \quad v_M^{\pi-\varphi} = u_M^\varphi, \\ b_M^{\pi-\varphi} &= -a_M^\varphi, \quad a_M^{\pi-\varphi} = -b_M^\varphi; \\ v_M^{\varphi-\pi} &= -v_M^\varphi, \quad v_M^{\pi-\varphi} = u_M^\varphi, \\ a_M^{\varphi-\pi} &= a_M^\varphi, \quad a_M^{\pi-\varphi} = -b_M^\varphi, \end{aligned}$$

получаем, что усреднение вероятности символьной ошибки по распределению Тихонова приводит к соотношению

$$\begin{aligned} P_{MPSK}^e(h_{bc}^2, \rho) &= G_{MPSK}^e(\rho, M) + \\ &+ \int_0^\pi \left[Q\left(\sqrt{2h_c^2} \sin \varphi\right) + 2T\left(\sqrt{2h_c^2} \sin \varphi, \operatorname{ctg} \varphi\right) \right] \times \\ &\times \left[\omega\left(\varphi - \frac{\pi}{M}\right) - \omega\left(\varphi + \frac{\pi}{M}\right) \right] d\varphi, \end{aligned} \quad (9a)$$

где $h_c^2 = h_{bc}^2 \log_2 M$ и

$$\begin{aligned} G_{MPSK}^e(\rho, M) &= \\ &= 2 \int_{\pi/M}^\pi \omega(\varphi) d\varphi = 1 - 2 \int_0^{\pi/M} \omega(\varphi) d\varphi. \end{aligned} \quad (9b)$$

Рассмотрим предельные случаи. При $\rho \rightarrow \infty$ $\omega(\varphi - \varphi_0) = \delta(\varphi - \varphi_0)$, поэтому $\lim_{\rho \rightarrow \infty} G_{MPSK}^e(\rho, M) = 0$, следовательно:

$$\begin{aligned} P_{MPSK}^e(h_{bc}^2) &= \lim_{\rho \rightarrow \infty} P_{MPSK}^e(h_{bc}^2, \rho) = \\ &= Q\left(\sqrt{2h_{bc}^2 \log_2 M} \sin \frac{\pi}{M}\right) + \\ &+ 2T\left(\sqrt{2h_{bc}^2 \log_2 M} \sin \frac{\pi}{M}, \operatorname{ctg} \frac{\pi}{M}\right), \end{aligned}$$

что совпадает с формулой, полученной для вероятности символьной ошибки при идеальном когерентном приеме сигналов ФМ-М [4].

Если $\rho = 0$, то, как видно из (9б), $P_{MPSK}^e(h_{bc}^2, 0) = G_{MPSK}^e(0, M) = 1 - \frac{1}{M}$ для любых

отношений сигнал/шум h_{bc}^2 . При обрыве канала связи ($h_{bc}^2 \rightarrow 0$) и произвольных значениях ρ вероятность символьной ошибки $P_{MPSK}^e(0, \rho) = \lim_{h_{bc}^2 \rightarrow 0} P_{MPSK}^e(h_{bc}^2, \rho) = 1 - \frac{1}{M}$. В этом случае (9)

принимает вид

$$\begin{aligned} P_{MPSK}^e(0, \rho) &= G_{MPSK}^e(\rho, M) + \\ &+ \int_0^\pi \left[1 - \frac{\varphi}{\pi} \right] \left[\omega\left(\varphi - \frac{\pi}{M}\right) - \omega\left(\varphi + \frac{\pi}{M}\right) \right] d\varphi. \end{aligned}$$

Если $h_{bc}^2 \rightarrow \infty$, то $\lim_{h_{bc}^2 \rightarrow \infty} P_{MPSK}^e(h_{bc}^2, \rho) = G_{MPSK}^e(\rho, M)$ и для всех отношений сигнал/шум h_{bc}^2 будет выполняться неравенство $P_{MPSK}^e(h_{bc}^2, \rho) \geq G_{MPSK}^e(\rho, M)$, т. е. существует нижняя граница вероятности ошибки, которая зависит от величины ρ и позиционности сигналов M и которая не может быть достигнута при $\rho > 0$.

Получение формул для символьной и битовой вероятности ошибок приема сигналов ФМ-М в условиях совместного действия фазовой ошибки и замираний не представляет собой сложности и может быть проведено самостоятельно. При этом, как и ранее, следует ожидать, что общие замирания значительно больше влияют на помехоустойчивость приема, чем фазовая ошибка. Поэтому можно использовать результаты расчета помехоустойчивости для канала связи только с общими замираниями [4].

Анализ вероятности ошибки когерентного приема сигналов КАМ-16 (16-QAM)

Символьная вероятность ошибки при фиксированной фазовой ошибке будет определяться по формуле

$$\begin{aligned} P_e(h_{bc}^2, \varphi) &= \frac{1}{2} \left\{ Q\left(k_1 \sqrt{h_{bc}^2}\right) + Q\left(k_2 \sqrt{h_{bc}^2}\right) + Q\left(k_3 \sqrt{h_{bc}^2}\right) \right\} + \\ &+ \frac{1}{4} \left\{ Q\left(\omega_1 \sqrt{h_{bc}^2}\right) + Q\left(\omega_2 \sqrt{h_{bc}^2}\right) + Q\left(\omega_3 \sqrt{h_{bc}^2}\right) + \right. \\ &+ Q\left(\omega_4 \sqrt{h_{bc}^2}\right) + Q\left(\gamma_1 \sqrt{h_{bc}^2}\right) + Q\left(\gamma_2 \sqrt{h_{bc}^2}\right) \left. \right\} - \\ &- \frac{1}{2} \left\{ Q\left(k_1 \sqrt{h_{bc}^2}\right) + Q\left(k_2 \sqrt{h_{bc}^2}\right) \right\} Q\left(k_3 \sqrt{h_{bc}^2}\right) - \\ &- \frac{1}{4} \left\{ Q\left(\omega_1 \sqrt{h_{bc}^2}\right) + Q\left(\omega_2 \sqrt{h_{bc}^2}\right) \right\} \times \\ &\times \left\{ Q\left(\omega_3 \sqrt{h_{bc}^2}\right) + Q\left(\omega_4 \sqrt{h_{bc}^2}\right) \right\} - \\ &- \frac{1}{4} Q\left(\gamma_1 \sqrt{h_{bc}^2}\right) Q\left(\gamma_2 \sqrt{h_{bc}^2}\right), \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} k_1 &= \frac{4}{\sqrt{5}} - 2\sqrt{2} \sin(\varphi + \Phi), \quad k_2 = 2\sqrt{2} \sin(\varphi + \Phi), \\ k_3 &= 2\sqrt{2} \cos(\varphi + \Phi) - \frac{4}{\sqrt{5}}; \\ \sin \Phi &= \frac{1}{\sqrt{10}}, \quad \cos \Phi = \frac{3}{\sqrt{10}}; \\ \omega_1 &= 2\sqrt{\frac{2}{5}} \sin\left(\varphi + \frac{\pi}{4}\right), \quad \omega_2 = \frac{4}{\sqrt{5}} - 2\sqrt{\frac{2}{5}} \sin\left(\varphi + \frac{\pi}{4}\right), \end{aligned}$$

$$\omega_3 = 2\sqrt{\frac{2}{5}} \cos\left(\varphi + \frac{\pi}{4}\right), \quad \omega_4 = \frac{4}{\sqrt{5}} - 2\sqrt{\frac{2}{5}} \cos\left(\varphi + \frac{\pi}{4}\right);$$

$$\gamma_1 = 6\sqrt{\frac{2}{5}} \sin\left(\varphi + \frac{\pi}{4}\right) - \frac{4}{\sqrt{5}}, \quad \gamma_2 = 6\sqrt{\frac{2}{5}} \cos\left(\varphi + \frac{\pi}{4}\right) - \frac{4}{\sqrt{5}}.$$

При идеальном когерентном приеме ($\varphi = 0$) $k_1 = k_2 = k_3 = \frac{2}{\sqrt{5}}$; $\omega_1 = \omega_2 = \omega_3 = \omega_4 = \frac{2}{\sqrt{5}}$; $\gamma_1 = \gamma_2 = \frac{2}{\sqrt{5}}$,

отсюда получаем известную формулу вероятности символической ошибки для сигналов КАМ-16 [2–4]

$$P_e(h_{bc}^2) = 1 - \left[1 - \frac{3}{2} Q \left(2\sqrt{\frac{h_{bc}^2}{5}} \right) \right]^2 =$$

$$= 3Q \left(2\sqrt{\frac{h_{bc}^2}{5}} \right) - \frac{9}{4} Q^2 \left(2\sqrt{\frac{h_{bc}^2}{5}} \right).$$

Битовая вероятность ошибки при фиксированной фазовой ошибке в первом и втором битах для КАМ-М, $M = 2^K$, K — четном определяется по формуле

$$P_{b1,2}(h_{bc}^2, \varphi) =$$

$$= \frac{2}{M} \sum_{i=1}^{\sqrt{M}/2} \sum_{j=1}^{\sqrt{M}/2} \left[Q \left(\frac{[(2i-1)\cos\varphi + (2j-1)\sin\varphi]d}{\sqrt{2N_0}} \right) + \right.$$

$$\left. + Q \left(\frac{[(2i-1)\cos\varphi - (2j-1)\sin\varphi]d}{\sqrt{2N_0}} \right) \right], \quad (10)$$

где $\varphi \in [-\pi, \pi]$; $d = \sqrt{\frac{6E_c}{M-1}}$; $h_c^2 = \frac{E_c}{N_0}$, $h_{bc}^2 = h_{bc}^2 \log_2 M$.

Для нахождения средней вероятности ошибки выражение (10) удобнее представить в виде

$$P_{b1,2}(h_{bc}^2, \varphi) = \frac{2}{M} \sum_{i=1}^{\sqrt{M}/2} \sum_{j=1}^{\sqrt{M}/2} \left[Q \left(\sqrt{2gr_{ij}^2 h_{bc}^2} \cos(\alpha_{ij} + \varphi) \right) + \right.$$

$$\left. + Q \left(\sqrt{2gr_{ij}^2 h_{bc}^2} \cos(\alpha_{ij} - \varphi) \right) \right],$$

где $g = \frac{3 \log_2 M}{2(M-1)}$; $r_{ij}^2 = (2i-1)^2 + (2j-1)^2$; $\alpha_{ij} = \arctg \frac{2j-1}{2i-1}$, $i, j = 1, \sqrt{M}/2$. Дальнейшие преобразования на основе формул, полученных в приложении, позволяют записать среднюю вероятность в виде

$$P_{b1,2}(h_{bc}^2, \rho) = G_{QAM}^b(\rho, M) + \frac{4}{M} \times$$

$$\times \sum_{i=1}^{\sqrt{M}/2} \sum_{j=1}^{\sqrt{M}/2} \left[\int_0^{\pi/2} Q \left(\sqrt{2gr_{ij}^2 h_{bc}^2} \cos\varphi \right) U(\varphi, \alpha_{ij}) d\varphi \right],$$

где

$$G_{QAM}^b(\rho, M) = \frac{4}{M} \sum_{i=1}^{\sqrt{M}/2} \sum_{j=1}^{\sqrt{M}/2} \left[\int_{-\pi/2}^{\pi/2} \omega(\varphi - \alpha_{ij} \pm \pi) d\varphi \right];$$

$$U(\varphi, \alpha_{ij}) = \omega(\varphi + \alpha_{ij}) + \omega(\varphi - \alpha_{ij}) -$$

$$- \omega(\varphi + \alpha_{ij} - \pi) - \omega(\varphi - \alpha_{ij} - \pi).$$

Заключение

В данной статье применительно к многопозиционным сигналам КАМ и ФМ показано, что зависимость вероятности ошибки от фазовой ошибки носит существенно нелинейный характер и, начиная с некоторого порогового значения, дальнейшее увеличение отношения сигнал/шум не приводит к повышению помехоустойчивости. Для многопозиционных сигналов, так же как и для двоичных, имеется своеобразный эффект энергетического насыщения, после которого уже нецелесообразно дальнейшее повышение энергетики и необходимы другие методы борьбы с этим эффектом. Полученные формулы могут быть использованы, в частности, для сравнительной оценки сигналов ФМ и КАМ в условиях неидеальной синхронизации, а разработанная методика — для получения аналогичных формул для других сигнальных конструкций, применяемых в современных системах передачи (например, сигналы АФМ в стандарте DVB-S2).

Приложение

Интегралы. Расчет интегральных выражений ($\alpha > 0$), встречающихся при усреднении вероятностей ошибок.

1. Рассмотрим интегралы

$$I_c(h, \rho) =$$

$$= \frac{1}{2} \int_{-\pi}^{\pi} [Q(h \cos(\alpha + \varphi)) + Q(h \cos(\alpha - \varphi))] \omega(\varphi) d\varphi; \quad (П1)$$

$$I_s(h, \rho) =$$

$$= \frac{1}{2} \int_{-\pi}^{\pi} [Q(h \sin(\alpha + \varphi)) + Q(h \sin(\alpha - \varphi))] \omega(\varphi) d\varphi. \quad (П2)$$

1.1. Рассмотрим выражение (П1). Используя четность функции косинус и плотности распределения вероятностей, получаем

$$I_c(h, \rho) = \int_0^{\pi} [Q(h \cos(\varphi + \alpha)) + Q(h \cos(\varphi - \alpha))] \omega(\varphi) d\varphi$$

или

$$I_c(h, \rho) = \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} Q(h \cos\varphi) \omega(\varphi - \alpha) d\varphi -$$

$$- \int_{\alpha}^{-\pi+\alpha} Q(h \cos\varphi) \omega(\varphi - \alpha) d\varphi,$$

$$I_c(h, \rho) = \int_{-\pi+\alpha}^{\pi+\alpha} Q(h \cos \varphi) \omega(\varphi - \alpha) d\varphi.$$

Разбиваем интервал интегрирования на три подынтервала, в каждом из которых тригонометрическая функция косинус сохраняет постоянный знак:

$$I_c(h, \rho) = \int_{-\pi+\alpha}^{-\pi/2} Q(h \cos \varphi) \omega(\varphi - \alpha) d\varphi + \int_{-\pi/2}^{\pi/2} Q(h \cos \varphi) \omega(\varphi - \alpha) d\varphi + \int_{\pi/2}^{\pi+\alpha} Q(h \cos \varphi) \omega(\varphi - \alpha) d\varphi.$$

Каждый из интегралов можно преобразовать различными способами. Например, *первый интеграл*, используя замену $\varphi + \pi = \psi$ и тождество $\cos(\psi - \pi) = -\cos\psi$, можно переписать в виде

$$I_c^1(h, \rho) = \int_{-\pi+\alpha}^{-\pi/2} Q(h \cos \varphi) \omega(\varphi - \alpha) d\varphi = \int_{\alpha}^{\pi/2} Q(-h \cos \varphi) \omega(\varphi - \alpha - \pi) d\varphi$$

или

$$I_c^1(h, \rho) = \int_{\alpha}^{\pi/2} \omega(\varphi - \alpha - \pi) d\varphi - \int_{\alpha}^{\pi/2} Q(h \cos \varphi) \omega(\varphi - \alpha - \pi) d\varphi.$$

Соответственно, *второй интеграл* можно записать в виде

$$I_c^2(h, \rho) = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} Q(h \cos \varphi) \omega(\varphi - \alpha) d\varphi = \int_0^{\pi/2} Q(h \cos \varphi) [\omega(\varphi + \alpha) + \omega(\varphi - \alpha)] d\varphi.$$

Используя замену $\varphi - \pi = \psi$ и тождество $\cos(\psi + \pi) = -\cos\psi$, получаем, что *третий интеграл*

$$I_c^3(h, \rho) = \int_{\pi/2}^{\pi+\alpha} Q(h \cos \varphi) \omega(\varphi - \alpha) d\varphi = \int_{-\pi/2}^{\alpha} Q(-h \cos \varphi) \omega(\varphi - \alpha + \pi) d\varphi$$

или

$$I_c^3(h, \rho) = \int_{-\alpha}^{\pi/2} \omega(\varphi + \alpha - \pi) d\varphi - \int_{-\alpha}^{\pi/2} Q(h \cos \varphi) \omega(\varphi + \alpha - \pi) d\varphi.$$

Заметим, что

$$\begin{aligned} & \int_{\alpha}^{\pi/2} Q(h \cos \varphi) \omega(\varphi - \alpha - \pi) d\varphi = \\ &= \int_0^{\pi/2} Q(h \cos \varphi) \omega(\varphi - \alpha - \pi) d\varphi - \\ & - \int_0^{\alpha} Q(h \cos \varphi) \omega(\varphi - \alpha - \pi) d\varphi; \\ & \int_{-\alpha}^{\pi/2} Q(h \cos \varphi) \omega(\varphi + \alpha - \pi) d\varphi = \\ &= \int_0^{\pi/2} Q(h \cos \varphi) \omega(\varphi + \alpha - \pi) d\varphi - \\ & - \int_0^{-\alpha} Q(h \cos \varphi) \omega(\varphi + \alpha - \pi) d\varphi. \end{aligned}$$

Последнее выражение можно преобразовать к виду

$$\begin{aligned} & \int_{-\alpha}^{\pi/2} Q(h \cos \varphi) \omega(\varphi + \alpha - \pi) d\varphi = \\ &= \int_0^{\pi/2} Q(h \cos \varphi) \omega(\varphi + \alpha - \pi) d\varphi + \\ & + \int_0^{\alpha} Q(h \cos \varphi) \omega(\varphi - \alpha + \pi) d\varphi. \end{aligned}$$

Подставляя полученные формулы, получаем, что

$$\begin{aligned} I_c^1(h, \rho) &= \int_{\alpha}^{\pi/2} \omega(\varphi - \alpha - \pi) d\varphi - \\ & - \int_0^{\pi/2} Q(h \cos \varphi) \omega(\varphi - \alpha - \pi) d\varphi + \\ & + \int_0^{\alpha} Q(h \cos \varphi) \omega(\varphi - \alpha - \pi) d\varphi; \\ I_c^3(h, \rho) &= \int_{-\alpha}^{\pi/2} \omega(\varphi + \alpha - \pi) d\varphi - \\ & - \int_0^{\pi/2} Q(h \cos \varphi) \omega(\varphi + \alpha - \pi) d\varphi - \\ & - \int_0^{\alpha} Q(h \cos \varphi) \omega(\varphi - \alpha + \pi) d\varphi. \end{aligned}$$

Следовательно, учитывая, что справедливо тождество $\omega(\varphi - \alpha - \pi) = \omega(\varphi - \alpha + \pi)$, можно переписать $I_c(h, \rho)$ в виде

$$I_c(h, \rho) = G_c(\rho) + \int_0^{\pi/2} Q(h \cos \varphi) U(\varphi, \alpha) d\varphi,$$

где

$$G_c(\rho) = \int_{\alpha}^{\pi/2} \omega(\varphi - \alpha - \pi) d\varphi + \int_{-\alpha}^{\pi/2} \omega(\varphi + \alpha - \pi) d\varphi;$$

$$U(\varphi, \alpha) = \omega(\varphi + \alpha) + \omega(\varphi - \alpha) - \omega(\varphi + \alpha - \pi) - \omega(\varphi - \alpha - \pi).$$

Выражение $G_c(\rho)$ можно представить в виде

$$G_c(\rho) = \int_{\alpha}^{\pi/2} \omega(\varphi - \alpha - \pi) d\varphi + \int_{-\pi/2}^{\alpha} \omega(\varphi - \alpha + \pi) d\varphi =$$

$$= \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \omega(\varphi - \alpha \pm \pi) d\varphi =$$

$$= \int_0^{\pi/2} [\omega(\varphi - \alpha \pm \pi) + \omega(\varphi + \alpha \mp \pi)] d\varphi.$$

Рассмотрим предельные случаи:

а) при $\rho \rightarrow \infty$ $\omega(\varphi - \varphi_0) = \delta(\varphi - \varphi_0)$, поэтому

$$\lim_{\rho \rightarrow \infty} I_c(h, \rho) = Q(h \cos \alpha), \quad \lim_{\rho \rightarrow \infty} G_c(\rho) = 0,$$

так как $(-\alpha) \notin [0, \pi]$. При $h \rightarrow 0$ получаем, что $\lim_{\rho \rightarrow \infty} I_c(h, \rho) = 0,5$;

б) если $\rho = 0$, то $\lim_{\rho \rightarrow 0} I_c(h, \rho) = \lim_{\rho \rightarrow 0} G_c(\rho) = 0,5$

для любых значений h ;

в) если $h \rightarrow \infty$, то $\lim_{h \rightarrow \infty} I_c(h, \rho) = G_c(\rho)$ и для

всех значений h будет выполняться неравенство $I_c(h, \rho) \geq G_c(\rho)$;

г) если $h \rightarrow 0$, то

$$\lim_{h \rightarrow 0} I_c(h, \rho) = \frac{1}{2} \int_0^{\pi/2} [\omega(\varphi - \alpha) + \omega(\varphi + \alpha) + \omega(\varphi - \alpha - \pi) + \omega(\varphi + \alpha - \pi)] d\varphi$$

и

$$\lim_{h \rightarrow 0} I_c(h, \rho) = \frac{1}{2} \int_{-\pi+\alpha}^{\pi+\alpha} \omega(\varphi) d\varphi = \frac{1}{2}.$$

1.2. Рассмотрим выражение (П2). Несложно убедиться, что

$$I_s(h, \rho) = \int_{-\pi+\alpha}^{\pi+\alpha} Q(h \sin \varphi) \omega(\varphi - \alpha) d\varphi.$$

Разбиваем интервал интегрирования на три подынтервала, причем в первом и третьем интервалах тригонометрическая функция синус сохраняет постоянный знак:

$$I_s(h, \rho) = \int_{-\pi+\alpha}^{-\pi} Q(h \sin \varphi) \omega(\varphi - \alpha) d\varphi +$$

$$+ \int_{-\pi}^{\pi} Q(h \sin \varphi) \omega(\varphi - \alpha) d\varphi +$$

$$+ \int_{\pi}^{\pi+\alpha} Q(h \sin \varphi) \omega(\varphi - \alpha) d\varphi.$$

Тогда

$$I_s(h, \rho) = G_s(\rho) + \int_0^{\pi} Q(h \sin \varphi) [\omega(\varphi - \alpha) - \omega(\varphi + \alpha)] d\varphi,$$

$$G_s(\rho) = \int_0^{\pi} \omega(\varphi + \alpha) d\varphi.$$

Рассмотрим предельные случаи:

а) при $\rho \rightarrow \infty$ $\omega(\varphi - \varphi_0) = \delta(\varphi - \varphi_0)$, поэтому

$$\lim_{\rho \rightarrow \infty} I_s(h, \rho) = Q(h \sin \alpha), \quad \lim_{\rho \rightarrow \infty} G_s(\rho) = 0,$$

так как $(-\alpha) \notin [0, \pi]$. При $h \rightarrow 0$ получаем, что $\lim_{\rho \rightarrow \infty} I_s(h, \rho) = 0,5$;

б) если $\rho = 0$, то $\lim_{\rho \rightarrow 0} I_s(h, \rho) = \lim_{\rho \rightarrow 0} G_s(\rho) = 0,5$

для любых значений h ;

в) если $h \rightarrow \infty$, то $\lim_{h \rightarrow \infty} I_s(h, \rho) = G_s(\rho)$ и для всех

значений h будет выполняться неравенство $I_c(h, \rho) \geq G_c(\rho)$;

г) если $h \rightarrow 0$, то

$$\lim_{h \rightarrow 0} I_s(h, \rho) = \frac{1}{2} \int_0^{\pi} [\omega(\varphi - \alpha) + \omega(\varphi + \alpha)] d\varphi$$

и

$$\lim_{h \rightarrow 0} I_s(h, \rho) = \frac{1}{2} \int_{-\pi+\alpha}^{\pi+\alpha} \omega(\varphi) d\varphi = \frac{1}{2}.$$

2. Рассмотрим интеграл

$$I_{sc}(h, \rho) = \int_{-\pi}^{\pi} Q(h \sin(\varphi + \alpha)) Q(h \cos(\varphi + \alpha)) \omega(\varphi) d\varphi.$$

Делая замену $\psi = \varphi + \alpha$, получаем, что

$$I_{sc}(h, \rho) = \int_{-\pi+\alpha}^{\pi+\alpha} Q(h \sin \psi) Q(h \cos \psi) \omega(\psi - \alpha) d\psi.$$

Разбивая интервал интегрирования на три части: $[\pi + \alpha, \pi]$, $[\pi, -\pi]$ и $[-\pi, -\pi + \alpha]$, используя замену соответственно в первом и третьем интегралах: $\psi = \varphi + \pi$, $\psi = \varphi - \pi$, получаем, что эти интегралы

лы в сумме дают ноль, так как $\omega(\varphi - \alpha - \pi) = \omega(\varphi - \alpha + \pi)$:

$$I_{sc}(h, \rho) = \int_0^{\alpha} Q(-h \sin \varphi) Q(-h \cos \varphi) \omega(\varphi - \alpha + \pi) d\varphi + \\ + \int_{-\pi}^{\pi} Q(h \sin \varphi) Q(h \cos \varphi) \omega(\varphi - \alpha) d\varphi + \\ + \int_{\alpha}^0 Q(-h \sin \varphi) Q(-h \cos \varphi) \omega(\varphi - \alpha - \pi) d\varphi.$$

Следовательно:

$$I_{sc}(h, \rho) = \int_{-\pi}^{\pi} Q(h \sin \varphi) Q(h \cos \varphi) \omega(\varphi - \alpha) d\varphi$$

или

$$I_{sc}(h, \rho) = \int_0^{\pi} Q(h \cos \varphi) \omega(\varphi + \alpha) d\varphi + \\ + \int_0^{\pi} Q(h \sin \varphi) Q(h \cos \varphi) [\omega(\varphi - \alpha) - \omega(\varphi + \alpha)] d\varphi.$$

Делая замену $\varphi = \frac{\pi}{2} + \psi$, $\psi \in \left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right]$, получаем, что

$$I_{sc}(h, \rho) = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} Q(-h \sin \psi) \omega\left(\psi + \alpha + \frac{\pi}{2}\right) d\psi + \\ + \int_{-\pi/2}^{\pi/2} Q(-h \sin \psi) Q(h \cos \psi) \times \\ \times \left[\omega\left(\psi - \alpha + \frac{\pi}{2}\right) - \omega\left(\psi + \alpha + \frac{\pi}{2}\right)\right] d\psi.$$

Первый интеграл

$$\int_{-\pi/2}^{\pi/2} Q(-h \sin \psi) \omega\left(\psi + \alpha + \frac{\pi}{2}\right) d\psi = \int_0^{\pi/2} \omega\left(\psi + \alpha + \frac{\pi}{2}\right) d\psi + \\ + \int_0^{\pi/2} Q(h \sin \psi) \left[\omega\left(\psi - \alpha - \frac{\pi}{2}\right) - \omega\left(\psi + \alpha + \frac{\pi}{2}\right)\right] d\psi,$$

второй интеграл

$$\int_0^{\pi/2} Q(-h \sin \psi) Q(h \cos \psi) \left[\omega\left(\psi - \alpha + \frac{\pi}{2}\right) - \omega\left(\psi + \alpha + \frac{\pi}{2}\right)\right] d\psi + \\ + \int_0^{\pi/2} Q(h \sin \psi) Q(h \cos \psi) \left[\omega\left(\psi + \alpha - \frac{\pi}{2}\right) - \omega\left(\psi - \alpha - \frac{\pi}{2}\right)\right] d\psi$$

или

$$\int_0^{\pi/2} Q(h \cos \psi) \left[\omega\left(\psi - \alpha + \frac{\pi}{2}\right) - \omega\left(\psi + \alpha + \frac{\pi}{2}\right)\right] d\psi + \\ + \int_0^{\pi/2} Q(h \sin \psi) Q(h \cos \psi) \left[\omega\left(\psi + \alpha - \frac{\pi}{2}\right) + \right. \\ \left. + \omega\left(\psi + \alpha + \frac{\pi}{2}\right) - \omega\left(\psi - \alpha - \frac{\pi}{2}\right) - \omega\left(\psi - \alpha + \frac{\pi}{2}\right)\right] d\psi.$$

Окончательно

$$I_{sc}(h, \rho) = G_{sc}(\rho) + \int_0^{\pi/2} [Q(h \sin \varphi) U(\varphi, \rho) + \\ + Q(h \cos \varphi) V(\varphi, \rho) + Q(h \sin \varphi) Q(h \cos \varphi) Z(\varphi, \rho)] d\varphi,$$

где

$$G_{sc}(\rho) = \int_0^{\pi/2} \omega\left(\psi + \alpha + \frac{\pi}{2}\right) d\psi; \\ U(\varphi, \rho) = \omega\left(\psi - \alpha - \frac{\pi}{2}\right) - \omega\left(\psi + \alpha + \frac{\pi}{2}\right); \\ V(\varphi, \rho) = \omega\left(\psi - \alpha + \frac{\pi}{2}\right) - \omega\left(\psi + \alpha + \frac{\pi}{2}\right); \\ Z(\varphi, \rho) = \omega\left(\psi + \alpha - \frac{\pi}{2}\right) + \omega\left(\psi + \alpha + \frac{\pi}{2}\right) - \\ - \omega\left(\psi - \alpha - \frac{\pi}{2}\right) - \omega\left(\psi - \alpha + \frac{\pi}{2}\right).$$

Литература

1. Савищенко Н. В. Помехоустойчивость когерентного приема сигналов двоичной амплитудно-фазовой модуляции при неидеальной синхронизации // Информационно-управляющие системы. 2009. № 3. С. 49–55.
2. Пропис Дж. Цифровая связь: Пер. с англ. / Под ред. Д. Д. Кловского. — М.: Радио и связь. 2000. — 800 с.
3. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение: Пер. с англ. — М.: Вильямс, 2003. — 1104 с.
4. Савищенко Н. В. Многомерные сигнальные конструкции: их частотная эффективность и помехоустойчивость приема: Монография / Под ред. Д. Л. Бураченко. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2005. — 420 с.

УДК 004.94

МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОННОГО МУАРОВОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРИБОРА

А. Антал,
научный сотрудник
Будапештский университет технологии и экономики

Представлена математическая модель возникновения муарового явления в электронном измерительном приборе. В классической схеме муарового оборудования первая оптическая система проецирует систему решеток на исследуемую поверхность, откуда полученное изображение посредством следующей оптической системы проецируется на интерференционную решетку. В случае муарового явления возникшая электронным методом деформированная информационная решетка поступает непосредственно в память вычислительной машины, в которой происходит обработка информации. Представленный метод может быть использован для конструкции специализированного измерительного прибора.

Ключевые слова – муаровый эффект, информационная решетка, измерительный прибор.

Введение

В настоящее время муаровый эффект применяется для решения таких задач, как создание контура трехмерных объектов [1], определение недостающих или сдвинутых деталей в мультикомпонентных сборках, измерение деформаций при анализе напряжений [2], анализ вибраций [3], а также линейных [4] и угловых смещений [5]. Первые упоминания о муаровом эффекте относятся к 1859 г., когда появилась работа Фуко, посвященная применению метода анализа качества элементов оптических систем.

Муаровый эффект наблюдается, когда любые два (или более) достаточно плотных массива линий, точек или других геометрических элементов накладываются друг на друга и рассматриваются в проходящем или отраженном свете. Таким образом, если два массива состоят из непрозрачных параллельных полос, и при этом имеется несовпадение либо в шаге этих полос, либо в их ориентации, при наложении таких решеток образуется интерференционная картина [6]. Поэтому при наложении периодических решеток из непрозрачных (чередующихся черных) и прозрачных (белых) зон образуется квазиинтерференционная картина [7], полосы которой называются муаровыми [8].

Для изучения природы муарового эффекта достаточно рассмотреть случай наложения двух решеток [9], состоящих из прямых параллельных

черных и белых полос равной ширины с неодинаковыми пространственными частотами. При наложении двух таких решеток возникают черные и белые области муаровой картины.

Измерительные приборы, работающие на основе муарового явления

Муаровый эффект предоставляет хорошие возможности для измерения тел различных форм, деформации или движущихся поверхностей. Применяемое оборудование для практических измерений связей между решетками, вызывающих муаровое явление, Виндишбауером [10] было разделено на 3 группы.

При использовании теневого оборудования [11, 12] муаровую задачу для обеих решеток (информационной и интерференционной) осуществляет одна физическая решетка вследствие негибкости связи. Однако, несмотря на то, что такое оборудование очень простое и с его помощью можно получить высококонтрастное изображение, оно достаточно тяжело в установке и трудно приспособляемое к характеру измерения. В проекционном муаровом оборудовании функция информационной и интерференционной решеток неодинакова, к тому же, находясь в разных частях прибора [13, 14], их параметры, такие как чувствительность и пространственные размеры, тоже могут быть различны. Общее свойство этих методов — возникновение муарового явления, содержащего ра-

бочую информацию внутри самого прибора, где и происходит выборка информации. На изображении, содержащем линии муара, информационная и интерференционная решетки не видны, поэтому разрешающая способность детектора и оптической системы чувствительного элемента зависят только от явления муара.

В случае муарового явления, полученного электронным методом [15], деформированная информационная решетка поступает непосредственно в память вычислительной машины, в которой происходят обработка и дискретизация данных, вследствие чего возникает муаровое явление. Это значит, что при максимальной разрешающей способности детектора происходит прием деформированной решетки и независимо от этого выбираются параметры процесса дискретизации. Оборудованию для электронного муарового явления соответствует проекционное, в котором интерференционная решетка в действительности отсутствует, и только ее виртуальный вид находится в памяти вычислительной машины.

Математическая модель измерительного прибора

Итак, суть классической схемы работы муарового оборудования заключается в проецировании системы штриховок первой оптической системой на исследуемую поверхность с последующей проекцией полученного изображения на интерференционную решетку второй системой, вследствие чего возникает изображение, содержащее муаровые полосы, непосредственно связанные с исследуемым объектом.

В случае электронного муарового оборудования деформированная решетка дискретизируется в память вычислительной машины двумя способами. В первом случае (тип А) деформированная решетка дискретизируется с помощью виртуальной решетки, состоящей из равнопромежуточных штрихов. Во втором случае (тип Б) деформированная решетка дискретизируется решеткой, возникшей с помощью плоской поверхности, показывающей на наличие в пространстве исследуемого объекта. Достаточно просто можно найти сходство между методом типа А и проекционным, и между методом типа Б и двухэкспозиционным муаровым.

В математическом описании предположим, что вместо оптического изображения использованы центральное и точечное изображения, это означает, что фокусное расстояние системы изображения многократно меньше, чем расстояние от объекта, и глубина резкого (резкости) изображения большая. При проекции решетки в пространстве объекта возникают светлые и темные

области, которые пересекают светлые и темные участки чувствительного прибора, образованные с помощью виртуальной решетки. Соответствующие, и в среднем самые светлые, точки образуют муаровые поверхности.

Оборудование типа А

Одну обыкновенную точку муаровой поверхности с помощью прямых ζ и ε можно очень просто определить (рис. 1). Прямая ε может быть определена с помощью точек 2 и 3:

$$y = \frac{f_s \cos \varphi}{nT_a + f_s \sin \varphi} (x - x_b) + \Delta y, \quad (1)$$

где Δy — ошибка установки, т. е. расстояние между центрами оптических систем 0 и 2 в направлении y ; T_a — шаг решетки в плоскости δ_s ; f_s — фокусное расстояние оптической системы в точке 2; n — переменная решетки; x_b — расстояние между центрами оптических систем 0 и 2 в направлении x .

Прямая ζ определяется через точки 1 и 0:

$$y = \frac{f_0}{\xi u T_a} x,$$

где f_0 — фокусное расстояние оптической системы в точке 0; ξ — соотношение пространственных частот решеток в плоскостях δ_0 и δ_s .

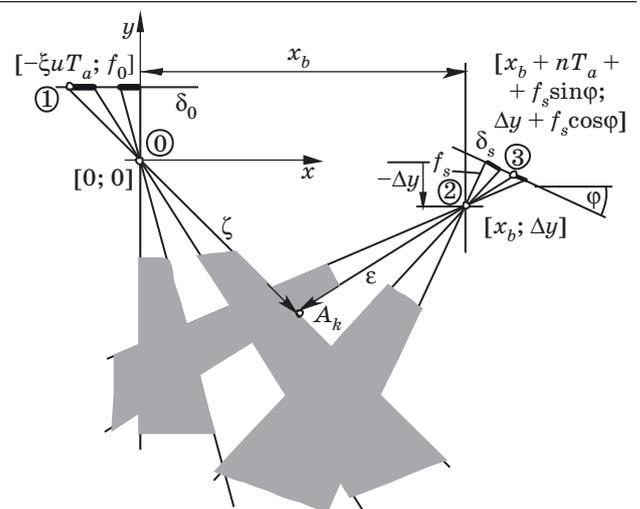
Если порядок поверхностей $k = n - u$, тогда прямая ζ получает форму

$$y = \frac{f_0}{\xi(n-k)T_a} x. \quad (2)$$

На основе уравнений (1) и (2) муаровую поверхность можно описать в форме

$$a_1 x^2 + a_2 xy + a_3 y^2 + a_4 x + a_5 y + a_6 = 0,$$

коэффициенты которой представлены в табл. 1.



■ Рис. 1. Модель муарового измерительного прибора типа А

■ **Таблица 1.** Коэффициенты вторичной формы (оборудование типа А)

Коэффициент	Выражение
a_1	0
a_2	$\xi f_s \cos \varphi + f_0$
a_3	$-\xi k T_a - \xi f_s \sin \varphi$
a_4	$f_0 \Delta y$
a_5	$\xi f_s \Delta y \sin \varphi - \xi f_s x_b \cos \varphi + \Delta y \xi k T_a$
a_6	0

На основе метода, опубликованного в работе [16], вторичная форма принимает вид гиперболы, так как выражение $(\xi f_s \cos \varphi - f_0)^2$ всегда положительно. Тогда координата центра вторичной формы

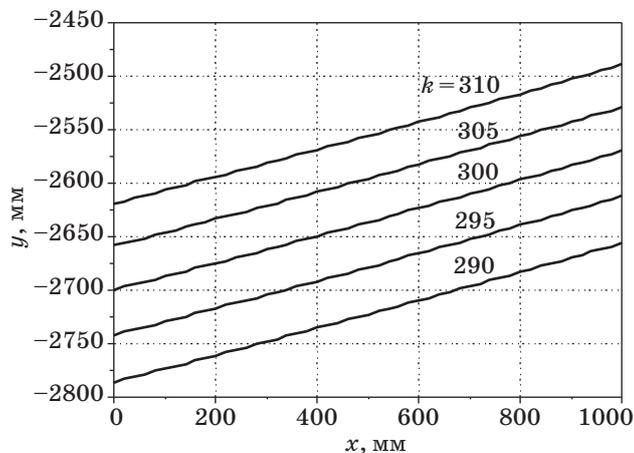
$$y_0 = \frac{f_0}{f_0 - \xi f_s \cos \varphi} \Delta y$$

и тангенсы углов асимптот равны:

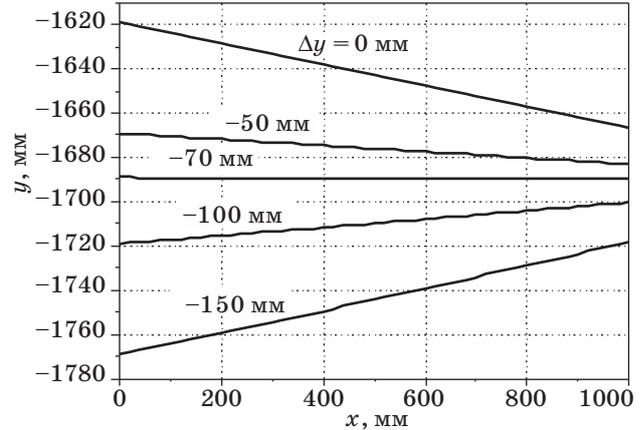
$$\operatorname{tg} \sigma_1 = 0; \quad (3)$$

$$\operatorname{tg} \sigma_2 = \frac{f_0 - \xi f_s \cos \varphi}{\xi k T_a - \xi f_s \sin \varphi}. \quad (4)$$

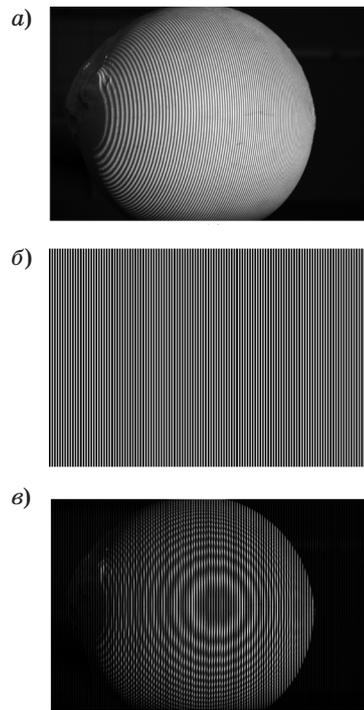
Из уравнений (3) и (4) видно, что углы асимптот гиперболы не зависят от ошибки установки (Δy). На рис. 2 изображены формы муаровых поверхностей различных порядков при постоянной величине ошибки установки оборудования типа А. На рис. 3 показано выравнивание 300-го порядка муаровой поверхности при изменении величины ошибки установки оборудования типа А. Процесс возникновения муарового явления при использовании прибора типа А представлен на рис. 4.



■ **Рис. 2.** Формы муаровых поверхностей отличных порядков при постоянной величине ошибки установки оборудования типа А ($\Delta y = 200$ мм, $x_b = 1500$ мм, $f_s = 25$ мм, $f_0 = 50$ мм, $\varphi = 16,7^\circ$, $T_a = 0,05$ мм, $\xi = 2$)



■ **Рис. 3.** Выравнивание 300-го порядка муаровой поверхности при изменении величины ошибки установки оборудования типа А ($x_b = 1500$ мм, $f_s = 25$ мм, $f_0 = 50$ мм, $\varphi = 16,7^\circ$, $T_a = 0,05$ мм, $\xi = 2$)



■ **Рис. 4.** Процесс возникновения муарового явления при использовании прибора типа А: а — информационная решетка; б — интерференционная решетка; в — муаровое явление

Оборудование типа Б

Прямая ζ может быть определена с помощью точек 1 и 2 (рис. 5):

$$y = \frac{f_s \cos \varphi}{n T_a + f_s \sin \varphi} (x - x_b) + \Delta y.$$

Координата точки $0A_n$ находится на пересечении прямых ζ_0 и $y = -L$:

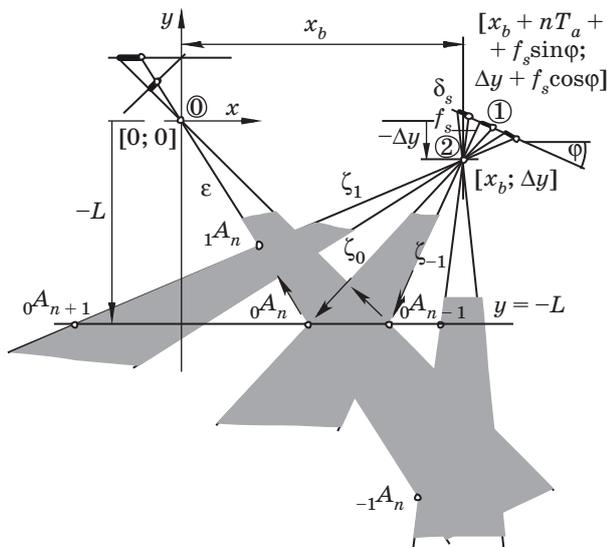


Рис. 5. Модель муарового измерительного прибора типа Б

$$L = \frac{f_s \cos \varphi}{nT_a + f_s \sin \varphi} (x - x_b) + \Delta y,$$

откуда получаем

$$x = (L - \Delta y) \frac{nT_a + f_s \sin \varphi}{f_s \cos \varphi} + x_b.$$

Решетку, находящуюся на экране ($y = -L$), проектируем через точку 2. Таким образом, дискретизируя деформированную решетку с помощью интерференционной решетки (это будем использовать постоянно), получаем муаровое явление.

Интерференционную решетку полностью определяет деформированная решетка в $y = -L$. Так как ее место и положение не влияют на возникновение самого явления, в определении точек муаровой поверхности достаточно использовать точку 2 и точки на поверхности решетки $y = -L$. Уравнение прямой ζ_0 будет

$$y = \frac{Lf_s \cos \varphi}{(L - \Delta y)(nT_a + f_s \sin \varphi) + x_b f_s \cos \varphi} x. \quad (5)$$

Отсюда очевидно, что точка нулевого порядка муаровой поверхности находится на пересечении ζ_0 и ε . Подобным образом на муаровой поверхности первого порядка находятся точки пересечения ζ_1 и ε . Таким образом, k -й порядок муаровой поверхности можно описать как

$$y = \frac{f_s \cos \varphi}{(n + k)T_a + f_s \sin \varphi} (x - x_b) + \Delta y. \quad (6)$$

Из уравнений (5) и (6) просто определяется уравнение вторичной формы (коэффициенты указаны в табл. 2)

Таблица 2. Коэффициенты вторичной формы (оборудование типа Б)

Коэффициент	Выражение
a_1	0
a_2	$\Delta y f_s \cos \varphi$
a_3	$-\Delta y k T_a - f_s x_b \cos \varphi + L k T_a$
a_4	$-\Delta y f_s L \cos \varphi$
a_5	$L x_b f_s \cos \varphi - \Delta y L k T_a + \Delta^2 y k T_a$
a_6	0

$$a_1 x^2 + a_2 x y + a_3 y^2 + a_4 x + a_5 y + a_6 = 0. \quad (7)$$

Вторичная форма описывается гиперболой, так как величина выражения $(\xi f_s \cos \varphi - f_0)^2$ тут тоже всегда положительная.

Тангенсы углов асимптот:

$$\operatorname{tg} \sigma_1 = 0;$$

$$\operatorname{tg} \sigma_2 = \frac{\Delta y f_s \cos \varphi}{f_s x_b \cos \varphi - L k T_a + \Delta y k T_a}. \quad (8)$$

Из этих уравнений видно, что одна асимптота всегда перпендикулярна в направлении y и угол (8) второй асимптоты, в отличие от случая с использованием прибора типа А, зависит от ошибки установки Δy . Различные порядки муаровых поверхностей при постоянной величине ошибки установки оборудования типа Б изображены на рис. 6, а различные формы муаровой поверхности 10-го порядка при изменении величины ошибки установки оборудования типа Б видны на рис. 7. Процесс возникновения муарового явления при использовании прибора типа Б изображен на рис. 8. При отсутствии ошиб-

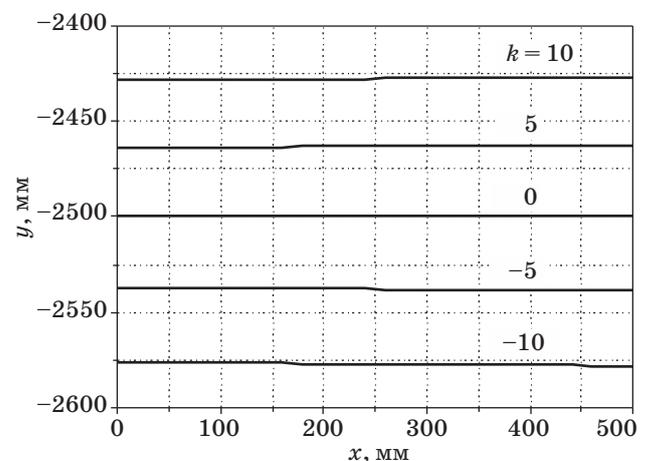
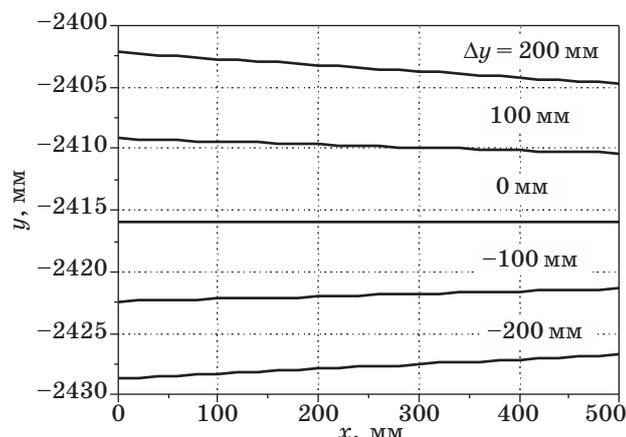
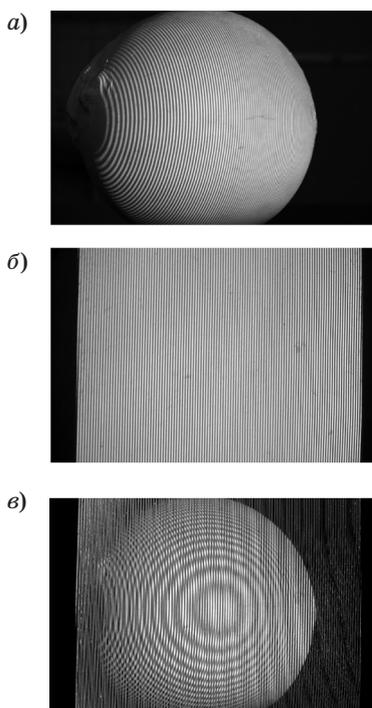


Рис. 6. Различные порядки муаровых поверхностей при постоянной величине ошибки установки оборудования типа Б ($\Delta y = -200$ мм, $x_b = 1500$ мм, $f = 25$ мм, $L = 2500$ мм, $\varphi = 16,7^\circ$, $T_a = 0,05$ мм)



■ **Рис. 7.** Различные формы муаровой поверхности 10-го порядка при изменении величины ошибки установки оборудования типа Б ($k = 10, x_b = 1500 \text{ мм}, f = 25 \text{ мм}, L = 2500 \text{ мм}, \varphi = 16,7, T_a = 0,05 \text{ мм}$)



■ **Рис. 8.** Процесс возникновения муарового явления при использовании прибора типа Б: а — информационная решетка; б — интерференционная решетка; в — муаровое явление

ки установки для всех порядков муаровых поверхностей асимптоты параллельны с осью x , следовательно, муаровые поверхности тоже параллельны. Уравнение k -го порядка муаровой поверхности имеет вид (коэффициенты указаны в табл. 3)

$$y_k = \frac{Lx_b f_s \cos \varphi}{f_s x_b \cos \varphi + LkT_a}$$

■ **Таблица 3.** Коэффициенты вторичной формы (оборудование типа Б) при отсутствии ошибки установки

Коэффициент	Выражение
a_1	0
a_2	0
a_3	$-f_s x_b \cos \varphi + LkT_a$
a_4	0
a_5	$Lx_b f_s \cos \varphi$
a_6	0

Выводы

На основе составленной математической модели измерительного прибора можно сделать следующие выводы.

1. Идеальные муаровые поверхности возникают только при отсутствии ошибки установки. В присутствии ошибки установки вместо плоских возникают гиперболические муаровые поверхности.

2. В практических измерениях увеличивается применимость прибора, если нулевой порядок находится близко к исследуемому объекту. В этом случае следует использовать прибор типа Б (см. рис. 5).

3. При использовании прибора типа Б муаровые поверхности нулевого порядка будут плоскостями. Разрешительная способность измерительного прибора будет лучше, если исследуемый объект находится перед муаровой поверхностью нулевого порядка и если центр проекции информационной решетки находится между объектом и центром оптической системы чувствительного прибора (см. рис. 6 и 7).

4. При использовании прибора типа Б возникающие муаровые поверхности не зависят от параметров оптической системы чувствительного прибора (см. рис. 5).

5. При использовании прибора типа А ошибка установки является средством выравнивания искаженной муаровой поверхности (см. рис. 2 и 3).

Автор выражает глубокую благодарность за финансовую поддержку в ходе выполнения проекта Государственному научному фонду ОТКА 15527 и проекту HUNOROV (HU-0045) за предоставление гранта Исландией, Лихтенштейном и Норвегией посредством механизма EEA Financial Mechanism и напрямую Венгерским национальным агентством развития. Также автор хотел бы отдельно поблагодарить Департамент исследований и технологий правительства Венгерской Республики (NKTH) за поддержку при выполнении части проекта TESH_08-A1/2-2008-0121 (NKTH).

Литература

1. Meadows D. M., Johnson W. O., Allen J. B. Generation of surface contours by moiré patterns // *Applied Optics*. 1970. N 9. P. 942–947.
2. Theocaris P. S. *Moiré Fringes in Strain Analysis*. Oxford: Pergamon, 1969. 442 p.
3. Der Hovanesian J., Hung Y. Y. Moiré contour—sum contour—difference, and vibration analysis of arbitrary objects // *Applied Optics*. 1971. N 10. P. 2734–2738.
4. Dovica M., Gmitterko A., Henriczyová T. Basic Study of the Mobile Minimechanism for Moving inside the Tubes with Small Diameter // *16 Intern. Kolloquium Feinwerktechnik / Technische Universität Budapest*. Budapest, 1997. P. 53–57.
5. Katuch P., Dovica M., Henriczyová T. Walking mini-robots with compliant body: Proc. of the sixth conf. on mechanical engineering. Budapest: BME, 2008. P. 1–6.
6. Merton T. Nouvelles methodes de fabrication des reseaux // *J. Phys. Radium*. 1952. N 13. P. 49–53.
7. Полухин П. И., Воронцов В. К., Кудрин А. Б., Чиенев Н. А. Деформации и напряжения при обработке металлов давлением // *Применения методов муар и координатных сеток*. — М.: Металлургия, 1974. — С. 42–45.
8. Павельева Д., Венцел К., Антал А. Сенсоры роботов 1 / Международный центр образования. Будапешт, 2004. 87 с.
9. Patorski K., Kujawska M. *Handbook of the Moiré Fringe Technique*. — Amsterdam: Elsevier, 1993. — 431 p.
10. Windischbauer G. Survey on Application of Moiré—Techniques in Medicine and Biology, Optics in Biomedical Sciences: Proc. of the Intern. Conf., Graz, Austria, September 7–11, 1981. Berlin: Springer-Verlag, 1982. P. 244–249.
11. Takasaki H. Moiré Topography // *Applied Optics*. 1970. N 9. P. 1467–1472.
12. Takasaki H. Moiré Topography // *Applied Optics*. 1973. N 12. P. 845–850.
13. Der Hovanesian J., Hung Y. Y. Moiré contour—sum, contour—difference, and vibration analysis of arbitrary objects // *Applied Optics*. 1971. N 10. P. 2734–2738.
14. Idesawa M., Yatagai T., Soma T. Scanning moiré method and automatic measurement of 3-D shape // *Applied Optics*. 1977. N 16. P. 2152–2162.
15. Paveleva D., Antal A. Computer Aided Color—encoded Moiré Contouring // *IEEE Intern. Conf. on Mechatronics*, July 3–5, 2006. P. 154.
16. Антал А. Теоретическое исследование искажающихся муаровых поверхностей // *Информационно-управляющие системы*. 2008. № 5(36). С. 5–8.

УДК 535+621

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АКТИВНОЙ КОМПЕНСАЦИЕЙ ОТКЛОНЕНИЯ ЛУЧА В АВТОКОЛЛИМАТОРЕ НА ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ

М. С. Дорошенко¹,
 младший научный сотрудник
 Институт проблем машиноведения РАН

Рассматривается принцип работы автоколлиматора, предлагается способ улучшения системы управления угловыми перемещениями с использованием экрана из пористого кремния. Анализируется эффективность управления определенными блоками автоколлиматора в целях повышения точности измерений.

Ключевые слова — автоколлиматор, принцип работы автоколлиматора, повышение точности автоколлиматора.

Для измерения углового рассогласования обычно используют автоколлимационный метод измерения, обладающий наибольшей чувствительностью [1].

Следуя методу, на одном из объектов располагают пассивный контрольный элемент (КЭ) — автоколлимационное зеркало (рис. 1), а на другом — приемно-излучающий блок — автоколлиматор (АК).

При наличии углового рассогласования между объектами происходит отклонение пучка, отраженного от контрольного элемента. Величина угла ξ отклонения пучка, являющаяся мерой углового рассогласования, определяется анализатором приемной системы АК.

В соответствии с классическим алгоритмом измерения по автоколлимационному методу при повороте КЭ отраженный пучок отклоняется от исходного направления, что приводит к смещению формируемого им изображения в плоскости анализа. Величина смещения изображения, измеряемая анализирующей системой, определяет искомый угол поворота КЭ. Таким образом, при любой схеме построения оптико-электронного автоколлиматора (ОЭАК) мерой измеряемых углов поворота контролируемого объекта является ве-

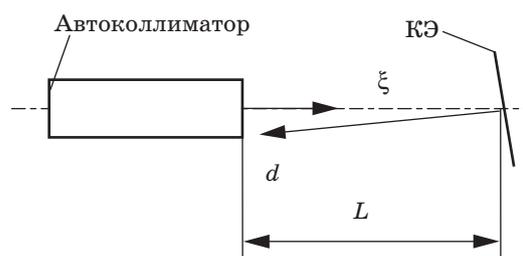
личина угла отклонения орта отраженного КЭ пучка от первоначального направления.

На практике, в частности при контроле угловых положений элементов зеркальной системы больших радиотелескопов, часто требуется контролировать угловые перемещения объекта на больших расстояниях с высокой точностью и при больших диапазонах изменения измеряемого перемещения. Выполнить эти требования не всегда удается ввиду их противоречивости. Кроме того, регистрация углового отклонения ξ отраженного пучка возможна только при условии его нахождения в пределах углового поля Ω измерительного оптико-электронного преобразователя (ИОЭП): $\xi \leq \Omega$.

Это означает, что диапазон измеряемых углов в соответствии с выражением

$$\xi = K \Theta \quad (1)$$

определяется соотношением



■ Рис. 1. Смещение отраженного пучка

¹ Научный руководитель — доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией методов и средств автоматизации Института проблем машиноведения РАН А. Е. Городецкий.

$$\Theta_{\max} = \Omega / K, \quad (2)$$

где Θ_{\max} — диапазон измерения угла Θ ; Ω — угловое поле ИОЭП; K — коэффициент преобразования КЭ.

Соотношения (1) и (2) определяют ограничение диапазона измерения «по угловому полю».

Диапазон измеряемых углов ОЭАК также ограничивается условием попадания принимаемого пучка в приемный объектив ИОЭП.

При величине дистанции L до контролируемого объекта и угле отклонения ξ центр отраженного пучка в плоскости входного зрачка объектива автоколлиматора (приемного объектива ИОЭП) оказывается смещенным относительно оптической оси на величину (см. рис. 1)

$$d = L \operatorname{tg}(\xi).$$

Очевидно, что измерения возможны только при условии попадания отраженного пучка во входной зрачок объектива автоколлиматора:

$$d \leq D/2, \quad (3)$$

где D — диаметр входного зрачка (апертура) объектива автоколлиматора (диаметр отраженного пучка полагается малым).

Наибольшее значение смещения d_{\max} определяется при подстановке в выражение (3) наибольшего угла отклонения пучка ξ_{\max} , соответствующего повороту КЭ на величину диапазона измерения:

$$\xi_{\max} = K \Theta_{\max}.$$

Таким образом, при увеличении диапазона измерения Θ_{\max} или дистанции L до объекта величина смещения d_{\max} также будет возрастать, что при конечной величине апертуры объектива приведет к 100 %-му виньетированию регистрируемого отраженного пучка и невозможности дальнейшего измерения. Фактически диапазон измерения Θ_{\max} или предельная дистанция L определяются из соотношений (диаметр самого отраженного пучка принимается малым)

$$d_{\max} = L \operatorname{tg}(\xi_{\max}) = L \operatorname{tg}(K \Theta_{\max}) = D/2. \quad (4)$$

Следовательно, при известных D и L реализуемый диапазон измерения Θ_{\max} определится как

$$\Theta_{\max} = \operatorname{arctg}(D/2L)/K. \quad (5)$$

В частности, при $D = 4 \cdot 10^{-2}$ м, $K = 1$ и $L = 50$ м (эти величины характерны для системы измерения угловых уходов ЗС РТ-70) получим $\Theta_{\max} \approx 4 \times$

$\times 10^{-4}$ рад, что явно недостаточно для обеспечения работоспособности системы измерения во всем диапазоне изменения измеряемых величин.

Следовательно, стоит задача увеличения рабочей дистанции при заданном диапазоне или расширения диапазона измерения при заданной дистанции.

Соотношения (4) и (5) определяют ограничение диапазона измерения и дистанции «по апертуре».

Из ограничений диапазона «по угловому полю» и «по апертуре» наиболее жестким с точки зрения приборной реализации является второе, поскольку ограничивает как диапазон измерения, так и рабочую дистанцию ОЭАК. По этой причине рассмотрим схему, позволяющую расширить диапазон измерения ОЭАК именно за счет уменьшения ограничения «по апертуре».

Известны три схемных решения ОЭАК, реализующих измерения с уменьшением ограничения «по апертуре»: с активной компенсацией отклонения пучка, с рабочим полипучком и со специальными КЭ [2].

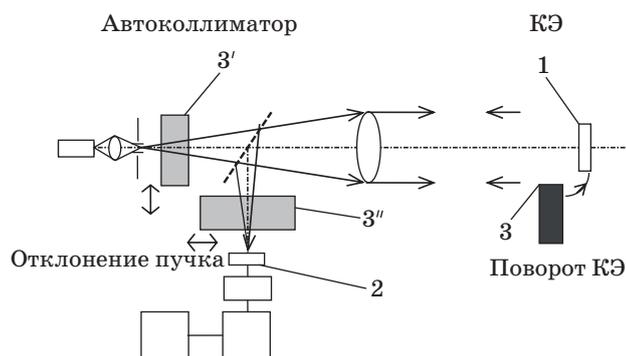
В схемах ОЭАК с активной компенсацией, обеспечивающей наибольшее ослабление ограничения (5), отклонения пучка при повороте КЭ на угол, превышающий допустимый (5), отраженный пучок с помощью управляемого отклоняющего элемента удерживается в пределах углового поля ИОЭП или в зоне входного зрачка его объектива.

Фактически, при этом используется один из методов сравнения, в частности, нулевой метод [3], который может явиться и способом уменьшения погрешности измерения, вызываемой нестабильностью параметров ОЭАК.

Эффективность использования активной компенсации зависит от положения компенсатора и от динамических свойств системы управления в измерительной цепи ОЭАК.

Очевидно, что ограничения как «по апертуре», так и «по угловому полю» отсутствуют, если в результате компенсации полностью восстанавливается первоначальный (до поворота КЭ) ход лучей через все оптические компоненты ОЭАК.

Для этого необходимо, чтобы компенсирующее воздействие оказывалось либо непосредственно на КЭ 1 (рис. 2), т. е. производился бы его поворот (например, с помощью электродвигателя обработки) в направлении, обратном повороту контролируемого объекта 3, либо на автоколлиматор в целом, т. е. производилось бы его смещение на $x = L/\operatorname{tg}\xi$. Очевидно, что в первом варианте в связи с малыми габаритами и весом КЭ динамические характеристики системы управления активной компенсацией (СУАК) могут быть лучше, чем во втором. Однако техническая реализация



■ Рис. 2. Схема ОЭАК с активной компенсацией

первого варианта не всегда осуществима из-за технологических соображений и условий эксплуатации объектов измерения.

При других возможных положениях компенсатора (позиции 3', 3'') восстанавливается только часть исходного хода лучей, что сохраняет без изменения ограничение диапазона измерения «по апертуре».

Однако эффективный с точки зрения расширения диапазона измерения способ активной компенсации требует использования высокоточной и быстродействующей СУАК с обратной связью по положению отраженного пучка.

Для повышения динамической точности системы управления угловыми перемещениями обычно вводится дополнительная обратная связь по скорости перемещения. В рассматриваемом случае представляется перспективным информацию о скорости перемещения отраженного луча получать, используя в анализаторе 2 (см. рис. 2) люминесцирующий экран из пористого кремния [4], обладающего эффектом усталости люминесценции [5]. Тогда, в зависимости от соотношения скорости движения по экрану отраженного луча и скорости затухания свечения экрана, получаемое изображение будет выглядеть совершенно по-разному.

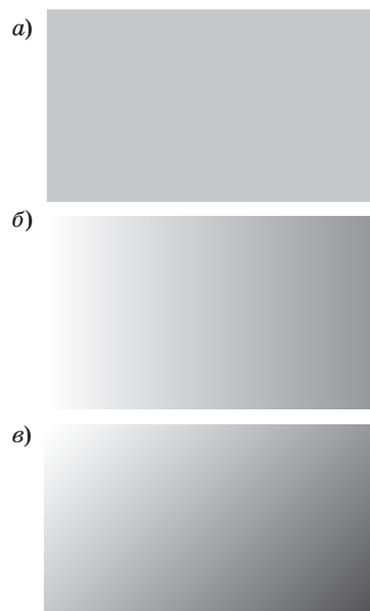
Для примера рассмотрим два наиболее простых предельных случая — почти неподвижный луч и быстро движущийся. В первом случае материал экрана будет «уставать» отображать проецируемое на него изображение, и будет наблюдаться постепенное ослабление яркости изображения луча вплоть до полного его исчезновения. Во втором случае, если движущийся луч перемещается на расстояние порядка своего размера за время, меньшее, чем время затухания экрана, изображение не будет отличаться от изображения на обычном экране. Наиболее интересен случай движения с промежуточной скоростью. При этом край луча, направленный в сторону движения, проецируется на свежие, ранее не активиро-

ванные участки экрана и отображается с нормальной яркостью. Противоположный край проецируется на области, уже люминесцировавшие какое-то время и поэтому слабее отзывающиеся на активацию. В результате изображение движущегося луча будет иметь градиент яркости в направлении движения. Величина этого градиента будет зависеть от соотношения времени затухания свечения и скорости движения.

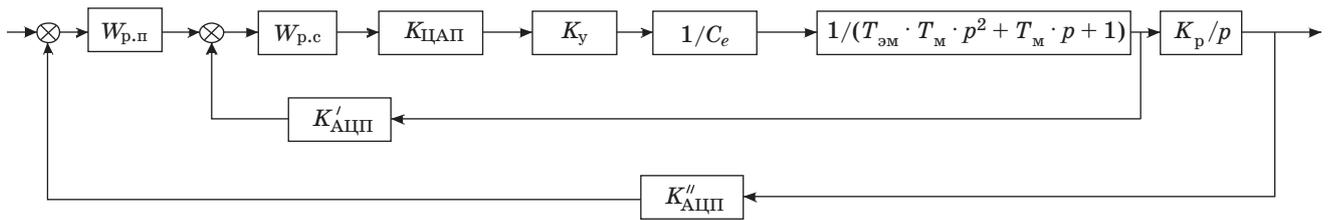
С помощью такого экрана можно определять скорость и направление движения «с одного взгляда» на экран, хотя, по самым общим представлениям, для определения скорости нужно иметь, по крайней мере, два отсчета. Следовательно, запаздывание в получении сигнала обратной связи по скорости в данном случае будет минимальным.

Результаты моделирования работы подобной системы определения скорости показаны на рис. 3.

Из начального положения (рис. 3, а) объект движется справа налево с условной скоростью v (рис. 3, б), затем — справа налево и снизу вверх со скоростью $v/3$ (рис. 3, в). Разница в скорости движения объектов заметна по интенсивности излучения их «заднего» края (т. е. правой стороны для объекта на рис. 3, б и правого нижнего угла для объекта на рис. 3, в). Чем медленнее движется объект, тем больше материал успевает «привыкнуть» к нему и тем темнее будет «задний» край. Разница между отображениями объектов, движущихся в разных направлениях, очевидна.



■ Рис. 3. Результаты компьютерного моделирования: а — неподвижное состояние луча; б — движение луча справа налево; в — движение луча справа налево и снизу вверх



■ Рис. 4. Структурная схема САУК

При расчете яркости объекта, в соответствии со свойствами пористого кремния, отклик материала на стационарное возбуждающее воздействие рассчитывался по формуле

$$I(t) = I_0 \exp(-t / \tau)^\gamma,$$

где I_0 — интенсивность люминесценции в начальный момент времени; τ и γ — характерное время и показатель степени растянутой экспоненты соответственно.

Причем в данном случае для эксперимента полагалось $\gamma = 0,8$. Теоретически это значение может лежать в интервале от 0 до 1 [6].

Легко заметить, что по внешнему виду объектов на рис. 3, б и в можно определить направление и относительную скорость перемещения объекта. Тем самым имитационное моделирование показывает возможность и эффективность измерения скорости с помощью экрана из нового функционального материала — пористого кремния.

Для иллюстрации влияния настроек регуляторов САУК рассмотрим систему, построенную на основе электродвигателя постоянного тока со следующими параметрами: номинальная скорость $\omega_n = 354$ 1/с; номинальный момент $M = 0,28$ нм; номинальное напряжение $U_n = 440$ В; момент инерции $J = 11 \cdot 10^{-6}$ кгм²; коэффициент ЭДС $C_e = 1,24$ В · с; постоянные времени $T_m = 2,6 \cdot 10^{-3}$ с и $T_{эм} = 1,3 \cdot 10^{-3}$ с. На структурной схеме САУК (рис. 4) используются следующие обозначения: $W_{p.п}$ — передаточная функция регулятора перемещения; $W_{p.с}$ — передаточная функция регулятора скорости; $K_{ЦАП}$ — коэффициент преобразования ЦАП; $K'_{АЦП}$ — коэффициент преобразования АЦП скорости двигателя; $K''_{АЦП}$ — коэффициент преобразования перемещения; K_y — коэффициент усиления усилителя; $C_e = U_n / \omega_n$; K_p — коэффициент редукции; p — оператор дифференцирования.

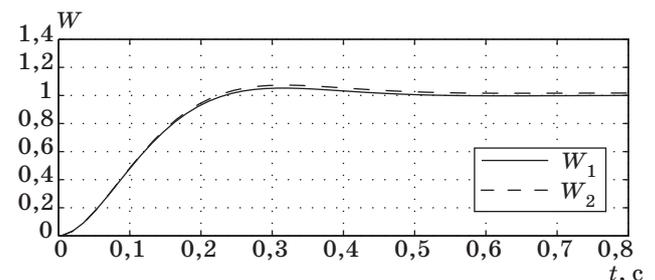
В качестве регулятора скорости двигателя будем использовать ПИД-регулятор с передаточной функцией $W_{p.с} = (K_3 p^2 + K_1 p + K_2) / p$ и следующей настройкой параметров: $K_1 = T_m$; $K_2 = 1$; $K_3 = T_m \cdot T_{эм}$, обеспечивающей наилучшее управление скоростью двигателя. Разрядность n ЦАП

и АЦП выбираем из условия получения погрешности преобразования не выше 0,01 %, т. е. $2^n \geq 100/0,01$. Положим $n = 14$, тогда $K_{ЦАП} = 2U_n / 2^{14} = 0,0537$, $K'_{АЦП} = 2^{14} / 2\omega_n = 23,14$ и $K''_{АЦП} = 2^{14} / 2x = 4,1 \cdot 10^5$ (при $x = 2 \cdot 10^{-2}$ м). Далее, если в САУК использовать ЦАП со стандартным уровнем выходного напряжения 12 В, то $K_y = 440/12 = 36,7$. Коэффициент редукции K_p выбираем, исходя из требуемой скорости перемещения АК $v_{АК} = 2000$ м/с: $K_p = v_{АК} / \omega_n = 5,65$.

Анализ влияния настройки регулятора перемещения проводился с помощью компьютерного моделирования САУК (рис. 5). При этом анализировались регуляторы двух типов: пропорциональный ($W_{p.п1} = K_p$) и ПИ-регулятор ($W_{p.п2} = K_p + K_i/p$).

При использовании стандартного двигателя в следящем режиме будет большая динамическая погрешность при времени измерения менее 0,4 с. Для уменьшения динамической погрешности и времени измерения требуется применять специализированный быстродействующий электропривод. Кроме того, можно исключить динамические погрешности, связанные с использованием электродвигателей для поворота АК, изменив следящий режим на режим переключения диапазонов измерения за счет поворота АК с помощью электропривода. При этом в пределах одного диапазона электропривод не будет работать и не будет вызывать соответствующие динамические погрешности. Однако на переключение диапазонов потребуется выделять определенное время порядка 0,5 с, в течение которого нельзя будет проводить измерения.

Таким образом, использовать электропривод поворота АК для увеличения диапазона измере-



■ Рис. 5. Результаты моделирования при $K_n = 1 \cdot 10^{-4}$, $K_u = 2 \cdot 10^{-5}$

ния можно только при медленно изменяющихся углах поворота объектов измерения. При быстрых изменениях углов поворота объекта измерения целесообразно для увеличения диапазона измерения перемещать либо сам КЭ (3 на рис. 2),

либо падающий или отраженный луч (3' или 3'' на рис. 2). В первом случае в качестве КЭ можно использовать гальванометр. Во втором случае по ходу луча устанавливается оптико-электронный дефлектор.

Литература

1. Джабиев А. Н., Коняхин И. А., Панков Э. Д. Автоколлимационные углоизмерительные средства мониторинга деформаций. — СПб.: СПбГИТМО (ТУ), 2000. — 197 с.
2. Коняхин И. А., Лю Лэй. Компенсационный алгоритм автоколлимационных измерений повышенной точности // Исследования в области оптики и физики: Науч.-техн. вестник СПбГУ ИТМО. 2005. Вып. 18. С. 232–236.
3. Городецкий А. Е., Тарасова И. Л. Управление и нейронные сети. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2005. — 312 с.
4. Городецкий А. Е., Компан М. Е., Шабанов Н. Ю., Панков Э. Д. Использование эффекта усталости

- люминесценции пористого кремния для адаптивной оптической обработки информации // Изв. вузов. Приборостроение. 1999. Т. 42. № 9. С. 52–55.
5. Gorodetsky A. E., Kompan M. E., Tarasova I. L. Self Formation of Porous Silicon Structure: Primary Microscopic Mechanism of Pore Separation // Solid State Phenomena. 2004. Vol. 97–98. P. 181–184.
 6. Боков В. Л., Новикова Ю. В., Пашков В. С., Тидеман Н. А. Исследование точностных характеристик оптико-электронных приборов с многоэлементными фотоприемниками // Изв. вузов. Приборостроение. 1989. № 11. С. 64–68.



Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН
 Университет Помпеу Фабра (Барселона, Испания)
 Технический университет Дрездена (Германия)
 ООО «Центр Специальных Информационных Технологий» (Санкт-Петербург)

III МЕЖДУНАРОДНЫЙ СЕМИНАР ПО СИСТЕМАМ МНОЖЕСТВЕННОГО ДОСТУПА «MACOM-2010»

Барселона, Испания, 13–14 сентября 2010 года

Тематика и цели семинара

Основы дисциплины, известной сейчас как «теория множественного доступа», были заложены Клодом Шенноном в 1961 году в его пионерской работе «Two-way Communication Channels» и позднее в 1970 году Норманном Абрамсоном в статье «The Aloha System — Another Alternative for Computer Communications», где была предложена концепция коллективного использования абонентами общего канала связи. Семинар MACOM проводится в третий раз в целях обсуждения как теории множественного доступа, так и вопросов стандартизации протоколов современных сетей передачи данных в части физического и канального уровней. В семинаре примут участие специалисты телекоммуникационных компаний и ведущие ученые, которые представят свои последние результаты в области множественного доступа и сопутствующих областях.

Направления работы

Теория множественного доступа.
 Технологии физического уровня (PHY), такие как CDMA, OFDMA и т. д.

Протоколы управления доступом к среде передачи (MAC), такие как 802.11, 802.16 и т. д.

Вопросы совместной оптимизации протоколов физического и канального уровней.

Теория очередей и систем поллинга.

Издание трудов

Все принятые работы публикуются в сборнике трудов Lecture Notes in Computer Science (SPRINGER).

Контрольные сроки

Заявки и тексты принимаются до 15 апреля 2010 года.

Все работы рецензируются Международным техническим комитетом.

Дополнительная информация и справки

Подробную информацию о мероприятии можно получить на web-странице MACOM-2010:

<http://www.csit-spb.ru/macom2010.html>

или у Алексея Викторовича Винеля (СПИИРАН):

эл. адрес: vinel@ieee.org.

УДК 681.2(61): 519.8: 617.3

МОДЕЛЬ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ ПРИ ОЦЕНКЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОРТЕЗИРОВАНИЯ НИЖНИХ КОНЕЧНОСТЕЙ

Л. М. Смирнова,

канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник
ФГУ «Санкт-Петербургский научно-практический центр медико-социальной экспертизы,
протезирования и реабилитации инвалидов им. Г. А. Альбрехта»

Рассматривается проблема принятия решения при многокритериальной инструментальной оценке результатов ортезирования при патологии стопы. Обоснована целесообразность использования моделей процесса принятия решения, разработанных на основе метода анализа иерархического процесса. Предложены модели принятия решения на этапе формирования плана обследования и на этапе оценки эффективности ортезирования по результатам этого обследования.

Ключевые слова — стопа, ортезирование, оценка эффективности, принятие решения, биотехническая система.

Введение

Объективизация оценки результатов ортезирования — весомая составляющая в деле повышения качества ортопедического обеспечения при патологии нижних конечностей, когда требуется выбрать наилучший для пациента вариант ортопедического изделия (ОИ) или его подгонки. Эффективность оценки качества ортезирования в целом зависит не только от эффективности использования методов и инструментальных средств для регистрации широкого спектра биомедицинской информации о состоянии биотехнической системы (БТС) «пациент — ортез», но и от эффективности принятия решения при анализе этой информации.

Постановка задачи поддержки принятия решения

При оценке функциональной эффективности ортезирования (ФЭО) специалист прежде всего сталкивается с проблемой принятия решения при выборе критериев оценки. Эта информация нужна уже при формировании плана обследования, чтобы измерить те биомеханические и физиологические параметры состояния БТС, которые используются в критериях. Затем встает проблема принятия решения при оценке результатов

этого обследования, чтобы сделать вывод об уровне эффективности ортезирования.

Большое количество подсистем и элементов БТС «пациент — ортез», различие в физической природе и характере связей между ними придают этой системе недетерминированность и динамичность. Это обуславливает необходимость оценки качества ортезирования с использованием большого количества плохо формализуемых показателей, определяемых в разных шкалах измерения и являющихся неравными по значимости для патологии, при которой назначается ортез.

Во многих областях деятельности для принятия решения при многокритериальной оценке используют методы, основанные на свертке ряда показателей в один суммарный индекс, что соответствует стратегии, направленной на достижение одной цели [1]. В области ортезирования такой подход не показал себя эффективным, так как в этом случае может быть случайно проигнорирована важная для врача информация, касающаяся индивидуальных проявлений патологии у пациента.

Решением проблемы может быть использование метода анализа иерархий [2]. Он, как и классические многокритериальные методы принятия решения, предоставляет эксперту структурированный подход к оценке стратегий в условиях не-

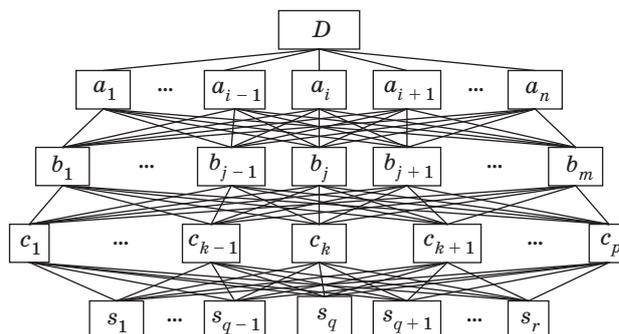
определенности, но, в отличие от них, позволяет легко учитывать как объективные, так и субъективные факторы, имеющие отношение к принятию решения. Эти особенности обуславливают интерес к методу в аспекте оценки результатов ортезирования. Однако попыток применения его в этой области найти не удалось.

Начальным этапом для реализации данного метода является разработка иерархической модели процесса принятия решения посредством декомпозиции этого процесса и выявление уровней иерархии различных факторов, влияющих на решение. Далее с помощью парных сравнений определяются приоритеты альтернатив каждого уровня в отношении альтернатив более высокого уровня, причем сравнения выполняются на основании суждений.

Построение модели принятия решения

Каждый случай ортезирования характеризуется показаниями, по которым назначается ОИ. Они учитывают патологию и ее симптомо-комплекс, возраст пациента, стадию заболевания и другие факторы, от которых зависят медико-биомеханические задачи ортезирования и функциональные требования к ОИ. Примером показаний к ортезированию может быть продольное плоскостопие у детей 3–5 лет с нефиксированным вальгусом пяточного отдела более 10 градусов.

Если бы показания к ортезированию пациента можно было всегда свести к одному из ранее условленных вариантов, то включение уровня показаний в модель не имело бы смысла, и следовало бы разработать модели процесса оценки ФЭО отдельно для каждого из вариантов показаний. Однако у пациента может наблюдаться сочетание патологий, каждая из которых является показанием к назначению ОИ, но предъявляет к нему различающиеся требования (например, укорочение конечности и системное поражение соединительной ткани). Комплекс показателей оценки эффективности ортезирования при этих патологиях тоже будет отличаться. Таким образом, на верхнем уровне иерархии модели процесса должны быть варианты показаний к назначению ОИ: $A = \{a_i\}, i = 1, 2, \dots, n$ (рис. 1).



■ Рис. 1. Структура модели процесса принятия решения при выборе критериев и оценке ФЭО

Функциональная эффективность ортезирования при различных показаниях оценивается разными группами показателей, вся совокупность которых составляет второй уровень иерархии в модели: $B = \{b_j\}, j = 1, 2, \dots, m$. Третьим уровнем являются критерии оценки данных показателей: $C = \{c_k\}, k = 1, 2, \dots, p$.

Модель с этими тремя уровнями соответствует процессу принятия решения при выборе критериев оценки результатов ортезирования. Модель процесса принятия решения при оценке ФЭО должна содержать также уровень, альтернативами которого являются различные БТС «пациент—ортез» (с разными ОИ) или разные состояния одной и той же БТС, отличающиеся вариантами подгонки ОИ. Назовем эти альтернативы вариантами состояния БТС и обозначим их $S = \{s_q\}, q = 1, 2, \dots, r$.

Чтобы определить отношения между элементами различных уровней иерархии, надо сформировать матрицы парных сравнений альтернатив для каждого из уровней модели. Рассмотрим формирование такой матрицы для альтернатив уровня «показания к назначению ОИ» (рис. 2). Если показанием к ортезированию явилась только одна патология, то необходимость парных сравнений на этом уровне исчезает. Но при сочетанных патологиях такие сравнения обязательны. При определении значимости альтернатив уровня А должны учитываться тяжесть проявления патологии и опасность ее последствий для пациента.

D	a_1	...	a_i	...	a_n	Вес	Нормализованный вес
a_1	1	...	a_{1i}	...	a_{1n}	$a_1 = (1 \cdot \dots \cdot a_{1i} \cdot \dots \cdot a_{1n})^{1/n}$	$w_{d,a1} = a_1 / (a_1 + a_2 + \dots + a_n)$
...	...	1	...	...	...	...	...
a_i	$1/a_{1i}$	...	1	...	a_{in}	...	$w_{d,ai} = a_i / (a_1 + a_2 + \dots + a_n)$
...	...	...	...	1	...	...	...
a_n	$1/a_{1n}$	...	$1/a_{in}$	...	1	$a_n = ((1/a_{1n}) \cdot \dots \cdot (1/a_{in}) \cdot \dots \cdot 1)^{1/n}$	$w_{d,an} = a_n / (a_1 + a_2 + \dots + a_n)$

■ Рис. 2. Расчет вектора приоритетов альтернатив первого уровня модели

Сравнивается значимость элемента левого столбца матрицы по отношению к значимости элемента в ее верхней строке. Количественные суждения о значимости пар альтернатив a_i и a_j задаются по многомерной шкале, учитывающей психофизические возможности человека [3]. Используется следующая характеристика шкалы. Для неразличимых a_i и a_j принимается $a_{ij} = 1$ (см. рис. 2). Если a_i незначительно предпочтительнее a_j , то $a_{ij} = 3$; если a_i значительно предпочтительнее a_j , то $a_{ij} = 5$; если a_i явно предпочтительнее a_j , то $a_{ij} = 7$; если a_i абсолютно предпочтительнее a_j , то $a_{ij} = 9$; для промежуточных вариантов $a_{ij} = 2, 4, 6, 8$. При численных значениях оценок они нормируются так, чтобы их сумма была равна единице. Для определения рейтинга показателей и критериев ФЭО целесообразно использовать оценки, полученные не только при опросе экспертов, но и в результате систематизации коллективного опыта, представленного в научных источниках.

Обозначим долю значимости альтернативы a_i через w_i , a_j — через w_j . Тогда элементом матрицы парных сравнений будет

$$a_{ij} = w_i/w_j, \text{ при этом } a_{ij} = 1/a_{ji}. \quad (1)$$

Поэтому если $a_{ij} = b$, то $a_{ji} = 1/b$; $b \neq 0$; $a_{ii} = 1$ для всех i :

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ 1/a_{12} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1/a_{1n} & 1/a_{2n} & \dots & 1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

В результате должны быть получены обратно симметричные матрицы, элементами которых является интенсивность проявления i -го элемента уровня иерархии по сравнению с ее j -м элементом по силе связи с объединяющим их элементом более высокого уровня.

Затем вычисляется главный собственный вектор матрицы A_{nn} , нормализацией которого получаем вектор приоритетов матрицы $W(DA)_n$ ($w_{d, a_1}, \dots, w_{d, a_i}, \dots, w_{d, a_n}$). Этот вектор является геометрическим средним и получается перемножением элементов в каждой строке матрицы A_{nn} и извлечением корней n -й степени, где n — число элементов.

Далее формируем n матриц парных сравнений множества показателей эффективности $(B_{mm} = \{b_{jj}\}, j = 1, 2, \dots, m)$ в отношении их значимости при соответствующих показаниях к ортезированию (a_1, a_2 и т. д. до a_n) (рис. 3). Для каждой из этих n матриц определяется вектор приоритетов $W(a_1, B), \dots, W(a_i, B), \dots, W(a_{1n}, B)$.

Из этих векторов приоритетов формируется матрица $W(AB)_{mn} = \{W(A, B)_{ij}\}, j = 1, 2, \dots, m; i = 1, 2, \dots, n$. Чтобы получить глобальный вектор приоритетов показателей $W(DB)_m$, перемножим эту матрицу на вектор собственных приоритетов $W(DA)_n$:

$$W(DB)_m = W(AB)_{mn} \cdot W(DA)_n. \quad (3)$$

В результате получим

$$\begin{bmatrix} w_{a_1, b_1} & \dots & w_{a_i, b_1} & \dots & w_{a_n, b_1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ w_{a_1, b_j} & \dots & w_{a_i, b_j} & \dots & w_{a_n, b_j} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ w_{a_1, b_m} & \dots & w_{a_i, b_m} & \dots & w_{a_n, b_m} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} w_{d, a_1} \\ \dots \\ w_{d, a_i} \\ \dots \\ w_{d, a_n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_{d, b_1} \\ \dots \\ w_{d, b_j} \\ \dots \\ w_{d, b_m} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Затем формируются m матриц парных сравнений множества критериев $(C_{pp} = \{c_{kk}\}, k = 1, 2, \dots, p)$ в отношении их информативности для оценки показателей $b_1, \dots, b_j, \dots, b_m$ (рис. 4). Для каждой из m матриц определяется нормализованный вектор приоритетов $W(b_1, C)_p, \dots, W(b_j, C)_p, \dots, W(b_m, C)_p$.

Из этих векторов приоритетов формируется матрица $W(BC)_{mp} = \{W(B, C)_{jk}\}, j = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, p$.

Чтобы получить глобальный вектор приоритетов критериев $W(DC)_p$, надо перемножить эту матрицу на вектор приоритетов показателей $W(DB)_m$:

$$W(DC)_p = W(BC)_{pm} \cdot W(DB)_m. \quad (5)$$

a_1	b_1	...	b_j	...	b_m	$W(a_1, B)$	a_i	b_1	...	b_j	...	b_m	$W(a_i, B)$	a_n	b_1	...	b_j	...	b_m	$W(a_n, B)$
b_1	1	...	b_{1j}	...	b_{1m}	w_{a_1, b_1}	b_1	1	...	b_{1j}	...	b_{1m}	w_{a_i, b_1}	b_1	1	...	b_{1j}	...	b_{1m}	w_{a_n, b_1}
...	...	1	...	...	...	...	...	...	1	...	...	...	...	...	...	1	...	...	...	...
b_j	$1/b_{1j}$	...	1	...	b_{jm}	w_{a_1, b_j}	b_j	$1/b_{1j}$	...	1	...	b_{jm}	w_{a_i, b_j}	b_j	$1/b_{1j}$	...	1	...	b_{jm}	w_{a_n, b_j}
...	...	...	...	1	...	...	...	...	...	...	1	...	...	...	...	...	...	1	...	...
b_m	$1/b_{1m}$	...	$1/b_{jn}$	...	1	w_{a_1, b_m}	b_m	$1/b_{1m}$	...	$1/b_{jn}$	...	1	w_{a_i, b_m}	b_m	$1/b_{1m}$	...	$1/b_{jn}$	...	1	w_{a_n, b_m}

■ Рис. 3. Определение вектора приоритетов второго уровня модели

b_1	c_1	...	c_k	...	c_p	$W(b_1, C)$
c_1	1	...	c_{1k}	...	c_{1p}	w_{b_1, c_1}
...	...	1	...	...	...	...
c_k	$1/c_{1k}$	...	1	...	c_{kp}	w_{b_1, c_k}
...	...	...	...	1	...	...
c_p	$1/c_{1p}$	...	$1/c_{kp}$	...	1	w_{b_1, c_p}

b_j	c_1	...	c_k	...	c_p	$W(b_j, C)$
c_1	1	...	c_{1k}	...	c_{1p}	w_{b_j, c_1}
...	...	1	...	...	...	...
c_k	$1/c_{1k}$	...	1	...	c_{kp}	w_{b_j, c_k}
...	...	...	...	1	...	...
c_p	$1/c_{1p}$	...	$1/c_{kp}$	...	1	w_{b_j, c_p}

b_m	c_1	...	c_k	...	c_p	$W(b_m, C)$
c_1	1	...	c_{1k}	...	c_{1p}	w_{b_m, c_1}
...	...	1	...	...	...	...
c_k	$1/c_{1k}$	...	1	...	c_{kp}	w_{b_m, c_k}
...	...	...	...	1	...	...
c_p	$1/c_{1p}$	...	$1/c_{kp}$	...	1	w_{b_m, c_p}

Рис. 4. Определение вектора приоритетов критериев оценки

В результате получим

$$\begin{pmatrix} w_{b_1, c_1} & \dots & w_{b_j, c_1} & \dots & w_{b_m, c_1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ w_{b_1, c_k} & \dots & w_{b_j, c_k} & \dots & w_{b_m, c_k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ w_{b_1, c_p} & \dots & w_{b_j, c_p} & \dots & w_{b_m, c_p} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} w_{d, b_1} \\ \dots \\ w_{d, b_j} \\ \dots \\ w_{d, b_m} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} w_{d, c_1} \\ \dots \\ w_{d, c_k} \\ \dots \\ w_{d, c_p} \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Информация о глобальных приоритетах критериев является основой для принятия решения при выборе критериев оценки ФЭО и построения плана обследования. Но для оценки тестируемых вариантов состояний БТС $\{S_q\}$, т. е. уровня ФЭО пациента при различных конструкциях ОИ или вариантов подгонки ОИ, необходимо сформировать p матриц парных сравнений этих вариантов по критериям c_1, c_2, \dots, c_k и так до c_p (рис. 5).

Для сравнения вариантов состояний БТС по критериям C_{pp} требуется принять шкалу суждений с отметкой эталонного (наилучшего) и браковочного (наихудшего) уровня этих критериев.

Во многих областях деятельности в качестве эталонных значений критериев используются экспериментально полученные значения при тестировании наилучшей модели продукции. В качестве браковочных принимаются значения, соответствующие низшему уровню качества. Продукция с качеством ниже этого уровня признает-

ся браком. Но в ортезировании подобный принцип не может быть использован, так как «эталонные» значения не могут быть определены экспериментально. Причиной этого, с одной стороны, является большая индивидуальность БТС «пациент—протез», с другой стороны, ограниченные возможности по увеличению объема экспериментальных обследований пациентов.

Проблему определения шкалы критериев в этом случае можно преодолеть следующим образом. За эталонную следует принять гипотетически «идеальную» модель БТС «пациент—ортез», качество которой является максимально возможным по каждому из показателей. Тогда эталонные значения критериев должны быть определены теоретически, как соответствующие этому уровню качества. Что касается «браковочных» значений критериев, то можно предложить в качестве таковых те значения, которые наблюдаются для пациента без ОИ. Это будет соответствовать основному принципу, который не должен забываться при работе с пациентом: «не навреди!».

При таком подходе более эффективным является использование тех критериев, оптимальными значениями которых являются: «минимум» (например, критерии энергозатрат при ходьбе), «максимум» (плавность переката через стопу и пр.), «1» (коэффициенты симметрии параметров левой и правой конечностей) или другие значения, не зависящие от индивидуальных особенностей пациента, в частности, возраста и пола. Используя такие критерии и шкалу, можно сравнить тестируемые варианты состояния БТС.

Если эталонные значения критериев зависят от возраста, пола или других индивидуальных

c_1	s_1	...	s_q	...	s_r	$W(c_1, S)$
s_1	1	...	s_{1q}	...	s_{1r}	w_{c_1, s_1}
...	...	1	...	...	...	...
s_q	$1/s_{q1}$	...	1	...	s_{qr}	w_{c_1, s_q}
...	...	...	...	1	...	...
s_r	$1/s_{r1}$	...	$1/s_{rq}$	...	1	w_{c_1, s_r}

c_k	s_1	...	s_q	...	s_r	$W(c_k, S)$
s_1	1	...	s_{1q}	...	s_{1r}	w_{c_k, s_1}
...	...	1	...	...	...	...
s_q	$1/s_{q1}$	...	1	...	s_{qr}	w_{c_k, s_q}
...	...	...	...	1	...	...
s_r	$1/s_{r1}$	...	$1/s_{rq}$	...	1	w_{c_k, s_r}

c_p	s_1	...	s_q	...	s_r	$W(c_p, S)$
s_1	1	...	s_{1q}	...	s_{1r}	w_{c_p, s_1}
...	...	1	...	...	...	...
s_q	$1/s_{q1}$	...	1	...	s_{qr}	w_{c_p, s_q}
...	...	...	...	1	...	...
s_r	$1/s_{r1}$	...	$1/s_{rq}$	...	1	w_{c_p, s_r}

Рис. 5. Определение вектора приоритетов БТС по критериям

особенностей пациента, то определить их теоретически не представляется возможным. Также невозможно экспериментально определить ряд эталонных значений для полного охвата всех возможных вариантов ортезирования.

Далее, нормализуя полученные оценки по шкале суждений, можно определить соответствующие векторы приоритетов состояний БТС по каждому из критериев (см. рис. 5). Из этих векторов формируется соответствующая матрица

$$W(CS)_{pr} = \{W(C, S)_{kq}, k = 1, 2, \dots, p, q = 1, 2, \dots, r\}.$$

Чтобы получить глобальный вектор $W(DS)_r$ приоритетов состояний S , надо умножить эту матрицу на глобальный вектор критериев $W(DC)_p$: $W(DS)_r = W(CS)_{rp} \cdot W(DC)_p$:

$$\begin{pmatrix} w_{c_1, s_1} & \dots & w_{c_k, s_1} & \dots & w_{c_p, s_1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ w_{c_1, s_q} & \dots & w_{c_k, s_q} & \dots & w_{c_p, s_q} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ w_{c_1, s_r} & \dots & w_{c_k, s_r} & \dots & w_{c_p, s_r} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} w_{d, c_1} \\ \dots \\ w_{d, c_k} \\ \dots \\ w_{d, c_p} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} w_{d, s_1} \\ \dots \\ w_{d, s_q} \\ \dots \\ w_{d, s_r} \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Компоненты вектора $W(DS)_r$ являются оценками r тестируемых состояний БТС «пациент—ортез». Пусть $w_{d, s1}$ будет оценка первого состояния БТС, $w_{d, s2}$ — второго, $w_{d, s3}$ — третьего. Тогда более эффективным будет признано ортезирование для того состояния БТС, оценка которого по глобальному вектору выше. Надо отметить, что оценка состояния БТС по каждому отдельному критерию (не говоря уже о глобальной оценке) не должна быть хуже, чем браковочное значение, т. е. значение критерия для состояния пациента без ОИ.

Рассмотрим использование предложенных моделей при оценке ФЭО, алгоритм которой представлен на рис. 6.

Трудоемкий и продолжительный этап разработки базовых моделей процесса принятия решения при выборе критериев оценки и при собственно оценке результатов ФЭО можно условно назвать «заочным», так как он не имеет отношения к конкретным пациентам и может быть выполнен заранее. Причем вторая из этих моделей является развитием первой.

На этапе построения плана биомеханического обследования присутствие пациента также не обязательно, но необходима информация о выявленных у него симптомо-комплексах, в соответствии с которыми ему было показано ортезирование. Эта информация в комплексе с «заочно» разработанной первой базовой моделью (моделью принятия решения при выборе критериев оценки



■ Рис. 6. Алгоритм оценки ФЭО при патологии стопы

ФЭО) позволяет сформировать рациональный план обследования, чтобы не тратить время на регистрацию параметров, которые не используются в этих критериях, что важно для предотвращения усталости пациента, снижения дрейфа параметров его состояния и повышения точности результатов обследования.

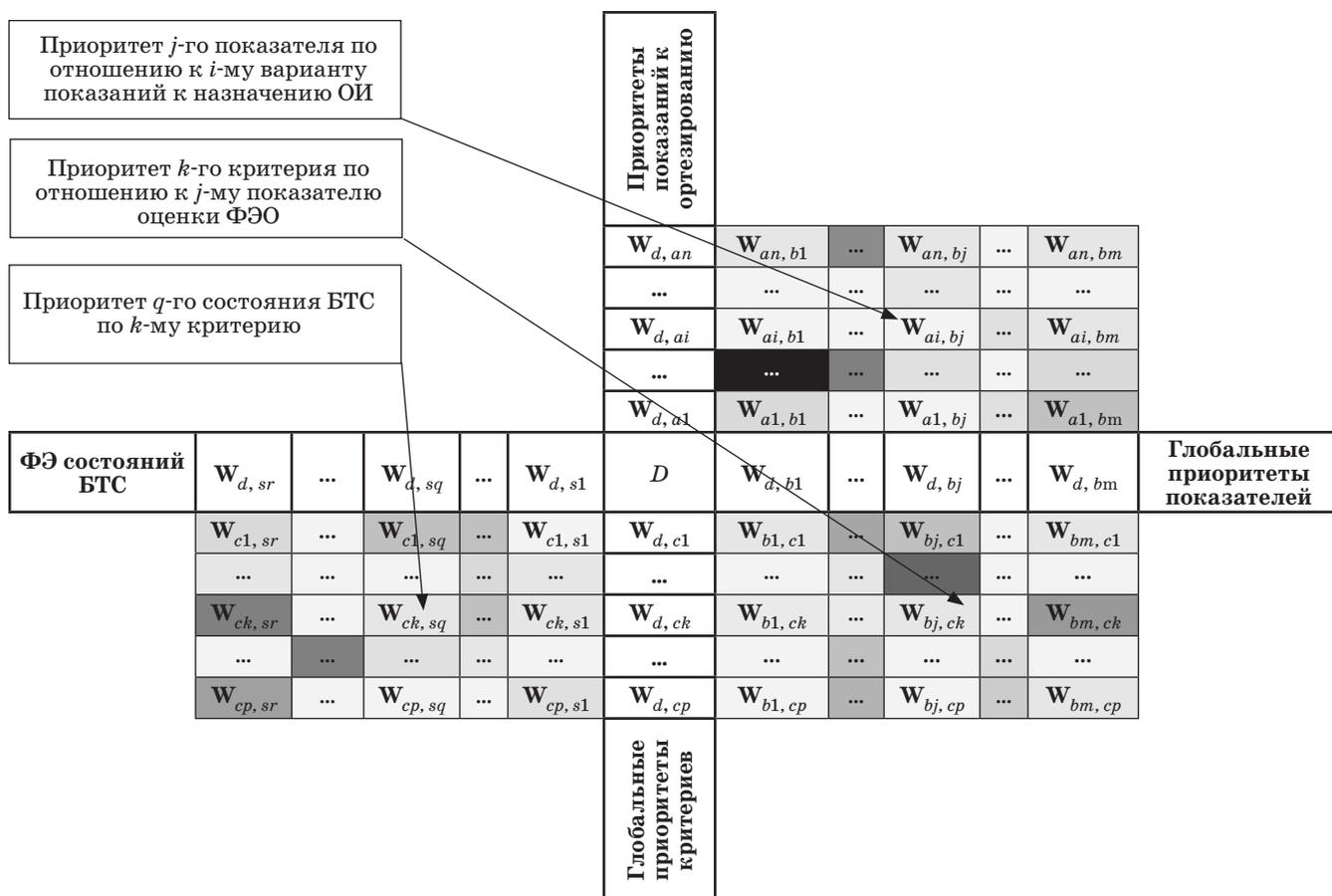
Этап, на котором принимается решение о ФЭО, можно назвать «очным», так как он основан на получении биомедицинской информации о состоянии БТС «пациент — ортез» и всегда выполняется для конкретного пациента и в его присутствии. Использование при этом «заочно» разработанной второй базовой модели (модели принятия решения при оценке результатов ФЭО) позволяет значительно сократить время на оценку тестируемых состояний БТС, снизить утомляемость специалиста, повысить точность и адекватность оценки результатов.

Необходимость сокращать продолжительность каждого из этих этапов определяет целесообразность использования для этих целей возможностей компьютерных технологий.

Большое значение для эксперта имеет также «прозрачность» той логики, которая заложена

в используемый метод принятия решений. Это может быть достигнуто благодаря созданию специализированного программного обеспечения, позволяющего отображать модель на экране монитора в информативной для визуального восприятия форме. С этой целью, при большом количестве альтернатив в модели, т. е. когда число связей между факторами столь велико, что линии, отображающие связи между ними, становятся неразличимыми (см. рис. 1), может быть предложено представление модели в матричной форме (рис. 7). Кодирование значимости альтернатив цветом еще более облегчает визуальное восприятие модели.

Разработкой специализированного программного обеспечения можно также обеспечить возможность быстрой модификации модели экспертом заранее или непосредственно в процессе оценки ФЭО. Добавляя новые альтернативы и изменяя их приоритеты, он сможет адаптировать модель к клинической ситуации, которая не была учтена в ней при разработке. Такая «гибкость» модели, вероятно, должна иметь большое значение для внедрения данного метода в ортезировании.



■ Рис. 7. Модель принятия решения при оценке ФЭО в матричной форме

Заключение

Множество плохо формализуемых показателей, определяемых в разных шкалах измерения и являющихся неравными по значимости для разных пациентов, обуславливают сложность оценки результатов ФЭО и ограничивают практическое применение инструментальных методов при данном виде контроля. Способствовать решению этой проблемы может поддержка принятия решения как на этапе выбора критериев оценки для формирования плана биомеханического обследования и измерения параметров состояния БТС, так и на этапе оценки результатов этих измерений.

Для обеспечения режимов поддержки принятия решений при оценке ФЭО целесообразно использовать модели, разработанные на основе анализа иерархий соответствующих процессов принятия решений.

Модель процесса принятия решения при выборе критериев оценки должна содержать иерархические уровни с альтернативами: показания к назначению ОИ, показатели эффективности ортезирования, критерии оценки. Для оценки эффективности ортезирования модель должна

также содержать уровень, альтернативами которого являются варианты состояний БТС «пациент—ортез».

Повышение эффективности метода обеспечивается отображением моделей принятия решения в матричной форме, автоматизацией связанных с их использованием расчетов, обеспечением возможности коррекции моделей непосредственно в процессе обследования пациента для адаптации к ранее неучтенной в ней клинической ситуации, что требует привлечения компьютерных технологий.

Литература

1. Плавинский С. Л. Биостатистика: Планирование, обработка и представление результатов биомедицинских исследований при помощи системы SAS. — СПб.: СПбМАПО, 2005. — С. 513–518.
2. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. — М.: Радио и связь, 1993. — 278 с.
3. Пфанцагль И. Теория измерений. — М.: Мир, 1976. — 248 с.

ПАМЯТКА ДЛЯ АВТОРОВ

Поступающие в редакцию статьи проходят обязательное рецензирование.

При наличии положительной рецензии статья рассматривается редакционной коллегией. Принятая в печать статья направляется автору для согласования редакторских правок. После согласования автор представляет в редакцию окончательный вариант текста статьи.

Процедуры согласования текста статьи могут осуществляться как непосредственно в редакции, так и по e-mail (80x@mail.ru).

При отклонении статьи редакция представляет автору мотивированное заключение и рецензию, при необходимости доработать статью — рецензию. Рукописи не возвращаются.

Редакция журнала напоминает, что ответственность за достоверность и точность рекламных материалов несет рекламодатели.

**Аль-Шайх
Хасан
Абдулла Ахмед**



Гражданин Йемена. Аспирант кафедры систем автоматизации проектирования Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ». В 2007 году окончил магистратуру Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ». Является автором двух научных публикаций. Область научных интересов — теория параметризации, системы параметризации и модификации конструкторских объектов, методы формирования параметрических моделей деталей, сборочных конструкций и чертежей, программирование на языке AutoLisp. Эл. адрес: shaikh2006@mail.ru

**АНТАЛ
Акош**



Гражданин Венгрии. Научный сотрудник кафедры мехатроники, оптики и приборостроения Будапештского технологического и экономики университета. В 1986 году окончил Будапештский технический университет по специальности «Приборостроение». В 1995 и 1996 годах стажировался в Чешском политехническом университете в Праге по специальности «Прикладная оптика». Является автором более сорока научных публикаций. Область научных интересов — обработка оптических изображений, анализ и синтез оптомехатронных систем и приборов. Эл. адрес: antalakov@antalakov.hu

**АНИТРОПОВ
Роман
Викторович**



Инженер ООО «Анkil». В 2002 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики по специальности «Мехатроника». Является автором двух научных публикаций и двух изобретений. Область научных интересов — проектирование и изготовление оптических систем, оптико-информационные системы. Эл. адрес: roman_aspherik@mail.ru

**БРОНШТЕЙН
Игорь
Григорьевич**



Директор Центра оптико-информационных технологий и систем Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. В 1973 году окончил Ленинградский институт точной механики и оптики. Является автором 58 научных публикаций. Область научных интересов — оптико-информационные системы. Эл. адрес: kb@jupiter.spb.ru

**ВАСИЛЬЕВ
Владимир
Николаевич**



Профессор, заведующий кафедрой компьютерных технологий, ректор Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики, действительный член и член-корреспондент ряда отраслевых и международных академий, заслуженный деятель науки РФ, почетный работник высшего профессионального образования РФ, награжден рядом правительственных наград. В 1974 году окончил Ленинградский политехнический институт. Является автором более 150 публикаций и 15 изобретений. Область научных интересов — оптико-информационные системы и технологии, нанотехнологии, компьютерные и телекоммуникационные технологии. Эл. адрес: vasilev@mail.ifmo.ru

**ВИДИН
Борис
Викторович**



Доцент, заместитель главного конструктора ФГУП «СПб ОКБ «Электроавтоматика» имени П. А. Ефимова», почетный авиастроитель. В 1957 году окончил Ленинградский институт авиационного приборостроения по специальности «Электронные вычислительные машины». В 1964 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 80 научных публикаций. Область научных интересов — проектирование цифровых вычислительных машин, методы проектирования бортового авиационного оборудования. Эл. адрес: postmaster@elavt.spb.ru

ДОРОШЕНКО
Максим
Сергеевич



Младший научный сотрудник лаборатории методов и средств автоматизации Института проблем машиноведения РАН. В 2009 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения по специальности «Информатика и управление в технических системах». Является автором двух научных публикаций. Область научных интересов — пористый кремний, информационные системы. Эл. адрес: m.s.doroshenko@gmail.com

ЖАРИНОВ
Игорь
Олегович



Доцент, главный специалист ФГУП «СПб ОКБ «Электроавтоматика» имени П. А. Ефимова». В 2000 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения по специальности «Радиоэлектронные системы». В 2004 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 60 научных публикаций. Область научных интересов — проектирование цифровых вычислительных машин, методы проектирования бортового авиационного оборудования, бортовая индикация. Эл. адрес: igor_rabota@pisem.net

ЖАРИНОВ
Олег
Олегович



Доцент кафедры моделирования вычислительных и электронных систем, заместитель декана факультета вычислительных систем и программирования Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. В 1996 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения по специальности «Радиоэлектронные системы». В 2003 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 35 научных публикаций. Область научных интересов — теория систем, теория обработки сигналов, цифровые вычислительные системы. Эл. адрес: zharinov@hotmail.ru

ЗВЕРЕВ
Виктор
Алексеевич



Профессор кафедры прикладной и компьютерной оптики Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. В 1961 году окончил Ленинградский институт точной механики и оптики. Заслуженный деятель науки РФ, лауреат Ленинской премии и премии Совета министров СССР, награжден орденом Трудового Красного Знамени и др. В 1989 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором более 200 научных публикаций и 75 авторских свидетельств. Область научных интересов — проектирование и изготовление оптических систем, оптико-информационные системы. Эл. адрес: post_vaz@rambler.ru

ЛИВШИЦ
Ирина
Леонидовна



Старший научный сотрудник, заведующая лабораторией «Специальные оптические и ТВ-системы» Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. В 1974 году окончила Ленинградский институт точной механики и оптики. В 1980 году защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 120 научных публикаций. Область научных интересов — оптические и оптико-информационные системы. Эл. адрес: irina@jupiter.spb.ru

ЛЯЧЕК
Юлий
Теодосович



Доцент кафедры систем автоматизированного проектирования Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ». В 1963 году окончил Ленинградский электротехнический институт им. В. И. Ульянова (Ленина) по специальности «Автоматика и телемеханика». В 1975 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 120 научных публикаций и пяти авторских свидетельств на изобретения. Область научных интересов — теория параметризации, компьютерная графика, методы проектирования топологических схем технических систем и др. Эл. адрес: tylyachek@mail.ru

МАРАХОВСКИЙ
Вячеслав
Борисович



Профессор кафедры компьютерных систем и программных технологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Награжден благодарностью президиума АН СССР и медалями «Изобретатель СССР» и «Ветеран труда». В 1963 году окончил Ленинградский политехнический институт имени М. И. Калинина. В 1992 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором более 240 научных публикаций, в том числе четырех монографий и около 80 изобретений. Область научных интересов — логическое проектирование устройств, прикладная теория автоматов, проектирование асинхронных устройств и др. Эл. адрес: vbmarak@gmail.com

МЕЛЕХИН
Виктор
Федорович



Профессор, заведующий кафедрой компьютерных систем и программных технологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, почетный работник высшего профессионального образования РФ. В 1960 году окончил Ленинградский политехнический институт имени М. И. Калинина. В 1984 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором более 230 научных публикаций, в том числе четырех монографий, 75 изобретений. Область научных интересов — теория и технология проектирования вычислительных систем и устройств. Эл. адрес: melekhin@aivt.ftk.spbstu.ru

МУХИНА
Оксана
Викторовна



Ассистент кафедры вычислительных систем и сетей Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. В 2003 году окончила Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения по специальности «Вычислительные машины, комплексы, системы и сети». Область научных интересов — компьютерная графика, интерактивное погружение (виртуальная реальность, расширенная реальность/виртуальность), адаптивные системы, использование вышеперечисленных концепций и технологий в образовании, культуре, промышленности, здравоохранении, спорте. Эл. адрес: int@aanet.ru

НДИКУМАГЕНГЕ
Жереми



Гражданин Бурунди. Аспирант кафедры автоматизированных систем обработки информации и управления Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ». В 2007 году окончил Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» по специальности «Автоматизированные системы управления». Является автором четырех научных публикаций. Область научных интересов — информационные системы, информационные технологии. Эл. адрес: arijere@hotmail.com

НИКИТИН
Александр
Васильевич



Доцент, директор научно-исследовательского отдела института компьютерного интерактивного моделирования при Санкт-Петербургском государственном университете аэрокосмического приборостроения. В 1974 году окончил Ленинградский институт авиационного приборостроения. В 1982 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 150 научных публикаций. Область научных интересов — компьютерная графика, интерактивное погружение (виртуальная реальность, расширенная реальность/виртуальность), мультимодальный интерфейс, адаптивные системы и др. Эл. адрес: nike51@mail.ru

САВИЩЕНКО
Николай
Васильевич



Профессор Военной академии связи. В 1986 году окончил Новосибирский государственный университет, в 1989 году — Военную академию связи. В 2006 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором более 100 научных публикаций. Область научных интересов — математическое моделирование каналов связи, помехоустойчивость сигналов, многомерные сигнальные конструкции. Эл. адрес: snikaspb@mail.ru

САНКИН
Петр
Сергеевич



Аспирант кафедры безопасности информационных систем Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. В 2006 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения по специальности «Информатика и вычислительная техника». Является автором четырех научных публикаций. Область научных интересов — криптография, сжатие изображений. Эл. адрес: spetros@gmail.com

СЕРГЕЕВ
Михаил
Борисович



Профессор, заведующий кафедрой вычислительных систем и сетей Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации. В 1980 году окончил Ленинградский электротехнический институт им. В. И. Ульянова (Ленина). В 2001 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором более 100 научных публикаций, 13 запатентованных изобретений. Область научных интересов — теория разрядных вычислений, методы проектирования спецпроцессоров для систем контроля и управления, оптико-информационные системы. Эл. адрес: ius@aanet.ru

СМИРНОВА
Людмила
Михайловна



Ведущий научный сотрудник отдела биомеханических исследований опорно-двигательной системы Санкт-Петербургского научно-практического центра медико-социальной экспертизы, протезирования и реабилитации инвалидов им. Г. А. Альбрехта. В 1980 году окончила Ленинградский кораблестроительный институт по специальности «Судовые силовые установки». В 1994 году защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 130 научных публикаций. Область научных интересов — теория и практическая реализация методов и программно-аппаратных средств диагностики и оценки эффективности протезов и ортезов нижних конечностей. Эл. адрес: info@diaserv.ru

УНАКАФОВ
Антон
Михайлович



Заведующий сектором разработки программного обеспечения ЗАО «ОКБ «Ритм», аспирант кафедры вычислительной техники Таганрогского технологического института Южного федерального университета. В 2007 году окончил Таганрогский технологический институт Южного федерального университета по специальности «Прикладная математика и информатика». Является автором более 20 научных публикаций. Область научных интересов — разработка и исследование программно-аппаратных методов контроля и коррекции психоэмоционального состояния человека. Эл. адрес: anton@rista.ru

УНЧУН ЧО



Гражданин Республики Корея. Профессор факультета инженерной механики Корейского политехнического университета. В 1987 году окончил университет Ёнсей (Республика Корея) со степенью бакалавра, в 1988 году получил степень магистра в университете Карнеги Меллон (США), в 1997 году — степень доктора в Политехническом институте Ренсселера (США). Является автором 35 научных публикаций. Область научных интересов — техническая оптика, лазеры, нанотехнологии, микрокомпоненты и материалы. Эл. адрес: cho@kpu.ac.kr

ЧЕРНУХИН
Юрий Викторович



Профессор кафедры вычислительной техники Таганрогского технологического института Южного федерального университета, действительный член Нью-Йоркской академии наук, член-корреспондент РАЕН, почетный работник высшего профессионального образования РФ. В 1965 году окончил Таганрогский радиотехнический институт. В 1985 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором более 300 научных публикаций и 27 запатентованных изобретений. Область научных интересов — принципы построения вычислительных сетей и др. Эл. адрес: chernukhin@dce.tsure.ru

УДК 629.7.05

Декомпозиционные методы в задачах распределения вычислительных ресурсов многомашиных комплексов бортовой авионики

Видин Б. В., Жаринов И. О., Жаринов О. О. Информационно-управляющие системы, 2010. № 1. С. 2–5.

Рассматривается подход к разработке эффективных методов организации вычислительных процессов на борту летательных аппаратов. Предлагается методика декомпозиции вычислительной системы на функциональные элементы.

Ключевые слова — многопроцессорные вычислительные системы, декомпозиция вычислительных задач.

Список лит.: 3 назв.

УДК 681.45

Анализ параметрической модели обобщенного триплета и его применение в оптико-информационных системах

Анитропов Р. В., Бронштейн И. Г., Васильев В. Н., Зверев В. А., Лившиц И. Л., Сергеев М. Б., Унчун Чо. Информационно-управляющие системы, 2010. № 1. С. 6–13.

Представлен анализ параметрической модели объектива типа «триплет», определены его основные абберационные свойства, приводятся примеры современного применения триплета в оптико-информационных системах.

Ключевые слова — объектив, абберации, оптико-информационные системы.

Список лит.: 8 назв.

УДК 004.946

Метод адаптивного представления интерактивных электронных сред с погружением

Мухина О. В., Никитин А. В. Информационно-управляющие системы, 2010. № 1. С. 14–17.

Предложен новый способ адаптации содержимого сцены интерактивной электронной среды с погружением к особенностям пользователя (знания, навыки, сенсорика, моторика и др.), позволяющий повысить эффективность взаимодействия пользователя с прикладной системой, ориентированной на решение определенного класса задач.

Ключевые слова — адаптация, интерактивность, погружение, электронные среды.

Список лит.: 10 назв.

УДК 629.7.05

Decomposition methods in the distribution of computing resources problems in multi-machine complexes of avionic equipment

Vidin B. V., Zharinov I. O., Zharinov O. O. IUS, 2010. N 1. P. 2–5.

In this work an approach to developing effective methods of the organization of computing processes on board aircrafts is discussed. A decomposition technique of the computing system down to functional elements is offered.

Keywords — multiprocessing computing systems, decomposition of computing problems.

Refs: 3 titles.

УДК 681.45

Analysis of a parametric model of the generalized triplet and its application in optical information systems

Anitropov R. V., Bronchtein I. G., Vasilyev V. N., Zverev V. A., Livshits I. L., Sergeev M. B., Unchung Cho. IUS, 2010. N 1. P. 6–13.

An analysis of a parametrical model for the generalized triplet is presented, its main aberration properties are described, examples of modern applications for the triplet in optical information systems are given.

Keywords — objective, aberrations, optical information systems.

Refs: 8 titles.

УДК 004.946

A method of adaptive presentation of the interactive electronic immersive environments

Mukhina O. V., Nikitin A. V. IUS, 2010. N 1. P. 14–17.

We offer a new approach to the adaptation of the interactive electronic immersive environment's scene's content tailored to the user's particular qualities (knowledge, attainments and etc.) that will allow to increase the effectiveness of user's interaction with the applied system that is oriented to the solution of a certain class of tasks.

Keywords — adaptation, interaction, immersion, electronic environments.

Refs: 10 titles.

УДК 681.3

Параметризация конструкторских чертежей

Аль-Шайх Хасан, Лячек Ю. Т. Информационно-управляющие системы, 2010. № 1. С. 18–24.

Рассмотрены проблемы создания параметрических моделей конструкторских объектов. Изложены особенности функционирования алгоритма параметризации чертежей, который базируется на аналитико-синтетическом методе. Изложены основные задачи, решаемые в процессе реализации алгоритма на каждом этапе его работы.

Ключевые слова — параметризация, чертеж, электронное представление, опорная сеть, графические примитивы, модель, модификация.

Список лит.: 4 назв.

УДК 002.53:004.65

Вычислительные модели параллельных транзакционных серверов

Ндикумагенге Ж. Информационно-управляющие системы, 2010. № 1. С. 25–28.

Рассматривается проблема разработки вычислительных моделей для транзакционных серверов данных, основанных на транзакционной концепции, для решения задачи безопасного хранения данных в случае параллельного доступа к данным и отказов.

Ключевые слова — база данных, вычислительная модель, параллельный процесс, распределенная система, транзакция, сервер данных.

Список лит.: 4 назв.

УДК 681.3

Проектирование средств синхронизации блоков глобально асинхронных систем с произвольной локальной синхронизацией

Маракховский В. Б., Мелехин В. Ф. Информационно-управляющие системы, 2010. № 1. С. 29–38.

Рассматриваются подходы к организации взаимодействия блоков в многопроцессорных системах с параллельно протекающими процессами, а также методика проектирования на базе самосинхронных схем устройства (синхростратума), координирующего взаимодействие блоков в глобально асинхронной системе.

Ключевые слова — синхронизация, логическое время, физическое время, синхронные и асинхронные автоматы, массив автоматов, синхростратум, проектирование.

Список лит.: 10 назв.

УДК 681.3

Parametric design drafts

Al-Shaikh Hasan, Lyachek Yu. T. IUS, 2010. N 1. P. 18–24.

The problems of creation parametrical models of design objects are discussed. The features of drawings parameterization algorithm functioning which is based on a analytical-synthetic method are stated. The primary goals solved during its realization at each stage of its operation are presented.

Keywords — parametric, draft, electronic view, base grid, graphic elements, model, modification.

Refs: 4 titles.

УДК 002.53:004.65

Computational models for concurrent transactional servers

Ndikumagenge J. IUS, 2010. N 1. P. 25–28.

The problem of developing computational models for transactional data servers based on the transactional concept for solving the safe storage task in the case of concurrent access to data and failures is described and studied.

Keywords — database, computational model, parallel process, distributed system, transaction, data server.

Refs: 4 titles.

УДК 681.3

Design of module synchronization facilities in globally asynchronous multiprocessor systems with arbitrary local synchronization

Marakhovsky V. B., Melekhin V. F. IUS, 2010. N 1. P. 29–38.

The paper is devoted to consideration of approaches to organizing inter module interaction in multiprocessor systems with concurrent functioning and to developing design methods of a self-timed circuit (synchronization stratum), which coordinates module interaction in a globally asynchronous system with arbitrary local synchronization.

Keywords — synchronization, logical time, physical time, synchronous and asynchronous automata, automata array, synch-stratum, logical design.

Refs: 10 titles.

УДК 004.415.2

Классификация и анализ методов программно-аппаратной поддержки процедур тренинга эмоционального самоконтроля человека

Чернухин Ю. В., Унакафов А. М. Информационно-управляющие системы, 2010. № 1. С. 39–44.

На основе построенной классификации существующих методов программно-аппаратной поддержки процессов тренинга эмоционального самоконтроля человека проведен их анализ. Вводятся понятия неадаптивных, адаптивных, интеллектуальных, пассивных и активных методов поддержки тренинга, рассматриваются основные тенденции в развитии этих направлений. Обсуждаются вопросы разработки и синтеза интеллектуальных методов поддержки тренинга эмоционального самоконтроля.

Ключевые слова — биологическая обратная связь, тренинг эмоционального самоконтроля, интеллектуальные методы.

Список лит.: 10 назв.

УДК 004.932.2

Анализ вторичной информации в JPEG

Санкин П. С., Литвинов М. Ю. Информационно-управляющие системы, 2010. № 1. С. 45–51.

Рассматриваются особенности передачи информации в последовательностях изображений, сжатых по алгоритму JPEG. Исследуется проявление вторичной информации в JPEG при разборе кодером случайных данных. Для повышения эффективности обработки при маскировании изображений вводится математическое описание модели, обеспечивающей эффективную стратегию сокрытия всей информации в JPEG-изображениях.

Ключевые слова — свойства изображений, вторичная информация, JPEG.

Список лит.: 2 назв.

УДК 621.39

Помехоустойчивость когерентного приема многопозиционных сигналов КАМ и ФМ при неидеальной синхронизации

Савищенко Н. В. Информационно-управляющие системы, 2010. № 1. С. 52–62.

Дается оценка потерь в мощности и помехоустойчивости когерентного приема сигналов при наличии ошибки в определении фазы несущей. Рассматриваются двумерные многопозиционные сигналы.

Ключевые слова — помехоустойчивость, когерентный прием, неидеальная синхронизация, многопозиционные сигналы КАМ и ФМ.

Список лит.: 4 назв.

UDK 004.415.2

Classification and analysis of the methods of hardware-software support of human emotional self-control training procedures

Chernukhin Yu. V., Unakafov A. M. IUS, 2010. N 1. P. 39–44.

This paper is devoted to classification of existing methods of emotional self-control training hardware-software support and their analysis according to the developed classification. The concepts of non-adaptive, adaptive, intelligent, passive and active methods of training support are introduced, the basic tendencies in the development in these directions are reviewed. The issues of developing intelligent emotional self-control training support methods are discussed.

Keywords — biofeedback, emotional self-control training, intellectual methods.

Refs: 10 titles.

UDK 004.932.2

Analysis of secondary information in JPEG

Sankin P. S., Litvinov M. Yu. IUS, 2010. N 1. P. 45–51.

In this paper, we consider methods for hiding information in a sequence of images compressed by the JPEG algorithm. We investigate the expression of secondary information in JPEG when decoding coders with random data. To enhance the effectiveness of treatment with masking introduces mathematical description of the model, which can be an effective strategy to conceal all information in JPEG images.

Keywords — image properties, secondary information, JPEG.

Refs: 2 titles.

UDK 621.39

Noise immunity of coherent reception of multi-position CAM and FM signals in the case of non-ideal synchronization

Savishenko N. V. IUS, 2010. N 1. P. 52–60.

We give an estimate of the power loss and noise immunity of signals coherent reception when there are errors in detecting the phase of the carrier frequency. Two-dimensional multi-position signals are considered.

Keywords — noise immunity, coherent reception, non-ideal synchronization, multi-position CAM and FM signals.

Refs: 4 titles.

УДК 004.94

Модель электронного муарового измерительного прибора

Антал А. Информационно-управляющие системы, 2010. № 1. С. 63–68.

Представлена математическая модель возникновения муарового явления в электронном измерительном приборе. В классической схеме муарового оборудования первая оптическая система проецирует систему решеток на исследуемую поверхность, откуда полученное изображение посредством следующей оптической системы проецируется на интерференционную решетку. В случае муарового явления возникающая электронным методом деформированная информационная решетка поступает непосредственно в память вычислительной машины, в которой происходит обработка информации. Представленный метод может быть использован для конструкции специализированного измерительного прибора.

Ключевые слова — муаровый эффект, информационная решетка, измерительный прибор.

Список лит.: 16 назв.

УДК 535+621

Анализ влияния динамических характеристик системы управления активной компенсацией отклонения луча в автоколлиматоре на погрешности измерения

Дорошенко М. С. Информационно-управляющие системы, 2010. № 1. С. 69–73.

Рассматривается принцип работы автоколлиматора, предлагается способ улучшения системы управления угловыми перемещениями с использованием экрана из пористого кремния. Анализируется эффективность управления определенными блоками автоколлиматора в целях повышения точности измерений.

Ключевые слова — автоколлиматор, принцип работы автоколлиматора, повышение точности автоколлиматора.

Список лит.: 6 назв.

УДК 681.2(61): 519.8: 617.3

Модель поддержки принятия решения при оценке функциональной эффективности ортезирования нижних конечностей

Смирнова Л. М. Информационно-управляющие системы, 2010. № 1. С. 74–80.

Рассматривается проблема принятия решения при многокритериальной инструментальной оценке результатов ортезирования при патологии стопы. Обоснована целесообразность использования моделей процесса принятия решения, разработанных на основе метода анализа иерархического процесса. Предложены модели принятия решения на этапе формирования плана обследования и на этапе оценки эффективности ортезирования по результатам этого обследования.

Ключевые слова — стопа, ортезирование, оценка эффективности, принятие решения, биотехническая система.

Список лит.: 3 назв.

UDK 004.94

A model of an electronic moire measuring instrument

Antal A. IUS, 2010. N 1. P. 63–68.

The paper contains a mathematical model of moiré pattern that appears in the electronic measurement equipment. In classical arrangements an equidistant grating is projected onto the examined surface, that is observed by the optical equipment and projected on the reference grating. In the case of electronically generated moiré pattern the image of deformed grating is stored and processed in the memory of a computer. The method presented in the article can be applied to the design of special measuring equipment.

Keywords — moire phenomenon, reference grating, measuring equipment.

Refs: 16 titles.

UDK 535+621

An analysis of influence of the dynamic characteristics of the beam deviation active indemnification control system on measurement errors in autocollimator

Doroshenko M. S. IUS, 2010. N 1. P. 69–73.

The autocollimator functioning principle is discussed, a means to improve a control system of angular movements by use of a porous silicon screen is offered. The management efficiency by autocollimator certain blocks with a view of increase of accuracy of measurements is analyzed.

Keywords — autocollimator, principle of work of an autocollimator, increase of accuracy of an autocollimator.

Refs: 6 titles.

UDK 681.2(61): 519.8: 617.3

Model of decision-making support for estimation of functional efficiency of orthosis for patients with foot pathology

Smirnova L. M. IUS, 2010. N 1. P. 74–80.

The problem of multi-criteria instrumental estimation of the results of the orthosis foot pathology has been discussed. Expediency of developing the decision-making model based on hierarchy analysis has been substantiated. The decision-making model for estimation of orthosis efficiency has been offered.

Keywords — foot, orthosis, estimation of the results, decision-making, biotechnical system.

Refs: 3 titles.