

# ИНФОРМАЦИОННО- УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ



6(31)/2007

6(31)/2007

# ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

РЕЦЕНЗИРУЕМОЕ ИЗДАНИЕ

**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. Хименко,  
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:** М. Л. Черненко, А. Н. Колешко

**Компьютерная верстка:** С. В. Барашкова

**Ответственный секретарь:** О. В. Муравцова

**Адрес редакции:** 190000, Санкт-Петербург,

Б. Морская ул., д. 67, ГУАП, РИЦ

Тел.: (812) 494-70-36

Факс: (812) 494-70-18

E-mail: 80x@mail.ru; ius@aanet.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: «Пресса России» — № 42476; «Роспечать» («Газеты и журналы») — № 15385

© Коллектив авторов, 2007

**ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И УПРАВЛЕНИЕ**

**Шаров С. Н.** *Возможности и целесообразность семантического сжатия информации дистанционного наблюдения* 2

**Козлов А. А., Литвинов М. Ю., Соловьев Н. В.** *Совмещение растровых изображений в системах технического зрения* 7

**МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ**

**Петухов И. С., Смирнова Н. Н.** *Моделирование структурно-сложных технических систем для решения задач оценки надежности, безопасности и переключения технических средств* 11

**КОДИРОВАНИЕ И ПЕРЕДАЧА ИНФОРМАЦИИ**

**Башун В. В., Сергеев А. В.** *Модель и протокол передачи видеоданных в реальном времени по беспроводному каналу* 20

**Беляев Е. А., Турликов А. М., Уханова А. С.** *Адаптивное арифметическое кодирование в стандарте JPEG 2000* 28

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ КАНАЛЫ И СРЕДЫ**

**Бестугин А. Р., Горбачкий В. В., Красюк В. Н.** *Аналитические и экспериментальные исследования влияния диэлектрических покрытий на излучение апертурных антенн* 34

**УПРАВЛЕНИЕ В МЕДИЦИНЕ И БИОЛОГИИ**

**Калининченко А. Н.** *О точности спектральных методов расчета показателей variability сердечного ритма* 41

**УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

**Алексеев В. В., Соложенцев Е. Д.** *Логико-вероятностное моделирование риска портфеля ценных бумаг* 49

**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

57

**АННОТАЦИИ**

60

**СОДЕРЖАНИЕ ЖУРНАЛА «ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ» за 2007 г. [№ 1–6]** 63

ЛР № 010292 от 18.08.98.  
Сдано в набор 29.10.07. Подписано в печать 21.12.07. Формат 60×84/8.  
Бумага офсетная. Гарнитура SchoolBookC. Печать офсетная.  
Усл. печ. л. 8,0. Уч.-изд. л. 9,0. Тираж 1000 экз. Заказ 682

Оригинал-макет изготовлен  
в редакционно-издательском центре ГУАП.  
190000, Санкт-Петербург, Б. Морская ул., 67.

Отпечатано с готовых диапозитивов  
в редакционно-издательском центре ГУАП.  
190000, Санкт-Петербург, Б. Морская ул., 67.

УДК 681.3.007

## ВОЗМОЖНОСТИ И ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТЬ СЕМАНТИЧЕСКОГО СЖАТИЯ ИНФОРМАЦИИ ДИСТАНЦИОННОГО НАБЛЮДЕНИЯ

**С. Н. Шаров,**

доктор техн. наук, начальник научно-аналитического отдела  
ОАО «Концерн „Гранит-Электрон“»

На примере аппаратуры дистанционного наблюдения за поверхностью Земли и окружающей атмосферы показаны возможность и целесообразность семантического сжатия информации путем фильтрации ее по приоритетам важности и достоверности.

The possibility and expediency of the semantic data compression by means of data filtering in accordance with levels of information significance and reliability is demonstrated by the example of the remote viewing equipment for the Earth surface and ambient air monitoring.

### Введение

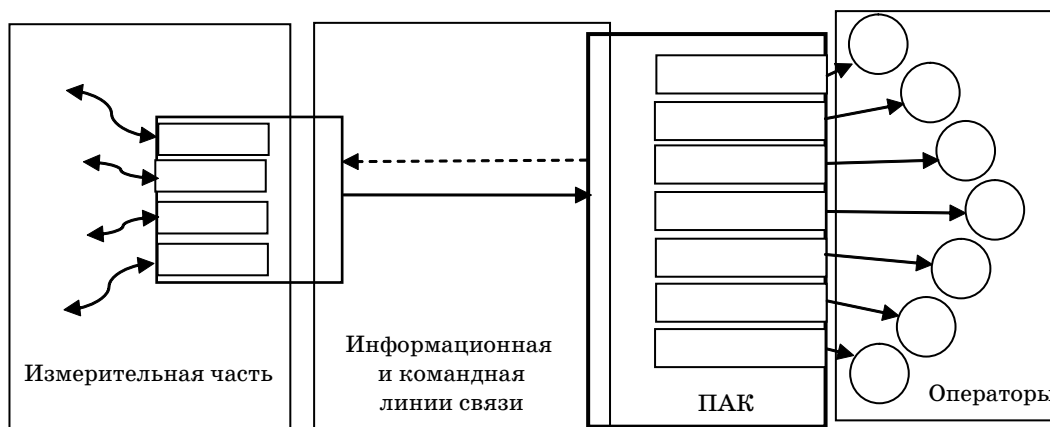
Комплекс аппаратуры дистанционного наблюдения состоит из трех основных частей (рис. 1): измерительной (сенсорной) части, аппаратуры линии связи и программно-аппаратного комплекса ПАК автоматической или (чаще) автоматизированной обработки информации, с которым работают люди-операторы, решающие разнообразные задачи [1–4].

По мере увеличения объема получаемой информации и скорости ее обновления (увеличение зоны наблюдения, увеличение разрешающей способности и динамического диапазона измеряемых сигналов, использование одновременно датчиков различной физической природы и т. д.) пропускная способность линии связи не позволяет передать

всю информацию, получаемую датчиками. Один из возможных технических путей сокращения передаваемой информации от измерительной части на пост наблюдения на основе семантического сжатия рассматривается в настоящей статье.

### Обзор методов сжатия передаваемой информации аппаратуры дистанционного наблюдения

Если дистанция удаления измерительной части и ПАК невелика, то можно использовать необходимое число параллельных линий связи. Для измерительной части, находящейся на расстоянии сотни и тысячи километров от ПАК (например, на космическом аппарате), используют радиолинии в СВЧ-диапазоне (десятки гигагерц). Дальнейшее



■ Рис. 1. Структурная схема комплекса аппаратуры дистанционного наблюдения

увеличение пропускной способности канала связи может достигаться использованием радиоизлучения в диапазоне сотен гигагерц или в оптическом диапазоне. Однако влияние атмосферы здесь столь велико, что организовать устойчивую работу канала связи чрезвычайно затруднительно. По этой причине основное внимание уделяется вопросам сжатия информации датчиков измерительной части.

Первичная информация, получаемая датчиками различной физической природы, представляется как относительное значение некоторой физической величины  $U$ , изменяющееся в координатах, например,  $X, Y, Z$  наблюдаемой площади или объема. Величиной  $U$  может быть интенсивность эхосигнала для активных оптических и радиолокационных датчиков, интенсивность теплового излучения или отражения солнечного света и т. д.

Максимальный мгновенный объем информации  $M_k$ , получаемый одним датчиком, определяется мгновенным полем зрения  $X_{п.з}, Y_{п.з}, Z_{п.з}$  датчика, максимальным значением наблюдаемого сигнала  $U_H$  и разрешающей способностью  $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$  и  $\Delta U$ , т. е.

$$M_k = (X_{п.з} Y_{п.з} Z_{п.з} U_H) / (\Delta X \Delta Y \Delta Z \Delta U).$$

Объем информации  $M_T$ , получаемый в одну секунду  $K$  датчиками с частотой обновления  $F_k$ , определяется как

$$M_T = \sum_{k=1}^K M_k \cdot F_k.$$

Величина  $M_T$  для современных и перспективных комплексов аппаратуры наблюдения может достигать  $10^{10}$ – $10^{12}$  байт.

Информацию по одному признаку измеряемой физической величины можно представить как монохромное плоское или объемное изображение в зоне наблюдения. Если датчики измеряют не один, а три признака сигнала (например, интенсивность, длительность и поляризацию эхосигнала), информация можно представить в виде цветного RGB плоского или объемного изображения. Для сжатия подобной графической информации разработаны и разрабатываются алгоритмические приемы, позволяющие (с допустимой потерей качества изображения) на порядок, а в некоторых случаях и более, снизить объем передаваемой информации. Хорошим примером служит популярный графический формат JPG.

Другими техническими приемами сжатия передаваемой информации являются алгоритмы, получившие название «программно-математическое обеспечение (ПМО) телеконференции». Здесь необходимо в один канал передачи и приема телевизионного изображения разместить 2–3 и более приемопередающих каналов, работающих в реальном масштабе времени. В этом случае для переда-

чи выбираются фрагменты кадров, в которых происходят изменения. Такие алгоритмические приемы позволяют поднять еще на порядок практическую пропускную способность канала связи или увеличить фактическую скорость передачи информации.

Если все известные алгоритмические приемы сжатия информации не удовлетворяют разработчиков комплексов аппаратуры наблюдения и канал связи не может пропускать информацию датчиков в реальном масштабе времени (допустимые задержки не должны превышать единиц секунд), остается возможность оперативного запоминания получаемой информации в измерительной части и после окончания сеанса наблюдения транслирования ее с допустимой скоростью в ПАК. Наблюдение всей заданной поверхности Земли или необходимого объема приземного пространства может длиться десятки минут и даже несколько часов [5]. Такой путь исключает возможность непрерывного наблюдения и вносит существенное запаздывание в получение результатов наблюдения, поэтому может иметь ограниченное применение.

Задача дистанционного наблюдения с атмосферным каналом связи осложняется тем, что передаваемая информация подвержена искажению под влиянием помех естественного и искусственного происхождения. Эта трудность преодолевается путем сужения полосы пропускания канала связи, кодирования и повторения сообщений. Для каждого комплекса наблюдения выбирается пропускная способность канала, обеспечивающая помехозащищенную передачу необходимой информации.

Таким образом, наблюдается тенденция увеличения объема и скорости обновления получаемой информации, с одной стороны, и ограничение пропускной способности линии связи, с другой стороны.

Естественным выходом из этого противоречия является передача не первичной информации датчиков, а обработанной до уровня, необходимого потребителю. Например, потребителя не интересуют флуктуации перепадов плотности или прозрачности атмосферы, но очень интересуют угроза тайфуна. Потребителя не интересуют уровни и другие признаки эхосигналов, но интересуют наличие судна-нарушителя в запретной зоне.

Формально такой путь означает полную автоматизацию обработки результатов наблюдений на месте размещения датчиков-измерителей. При наличии соответствующего ПМО современные вычислительные средства позволили бы в ряде случаев решить эту задачу. Однако отработка ПМО таких многофункциональных наблюдательных комплексов — сложная и длительная работа, требующая, особенно на первых этапах, постоянного вмешательства оператора.

Важно отметить, что выносимые решения являются многокритериальными и носят вероятностный характер.



Предлагается решить задачу сокращения передаваемой информации от измерительной части на пост наблюдения на основе семантической продукционной модели, как одного из вариантов системы с искусственным интеллектом.

### Семантическая продукционная модель комплекса аппаратуры дистанционного наблюдения

Продукционная модель комплекса дистанционного наблюдения содержит следующие основные части [6]: **I**; **Q**; **P**; **A=>B**; **N**, где:

**I** — имя информационных данных, с помощью которого данная продукция выделяется из всего множества продукций. В рассматриваемой задаче — это имя аномального явления (пожар, наводнение, концентрация вредного вещества и т. д.) и (или) измеряемого параметра с его числовой оценкой;

**Q** — характеризует сферу применения продукции (разложение получаемой информации по назначению: охрана, экология, научные исследования и т. д.);

**A=>B** — ядро — основной элемент продукции, правило принятия решения о наличии продукции и ее числовой оценки. **A** показывает детерминированные или стохастические условия, при которых возможно совершить действие **B**. Для рассматриваемой задачи **B** — условие целесообразной передачи некоторой определенной части информации оператору;

**P** — условие применимости ядра продукции. Когда **P** принимает истинное значение, ядро активизируется.

Элементы **N** описывают постусловия продукции. Они активизируются только в том случае, если ядро продукции реализовалось. Постусловия описывают действия и процедуры, которые необходимо выполнить после реализации **B**.

В памяти комплекса хранится набор наименований продукций. Они образуют систему продукций. В этой системе заданы определенные процедуры управления продуктами (приоритеты, временные и количественные ограничения), с помощью которых происходит выбор для выполнения той или иной продукции из числа активизированных.

### Система семантического сжатия передаваемой информации многоканального измерителя

Рассмотрим приведенную модель на примере структурной схемы обработки информации многоканального наблюдателя-измерителя (рис. 2), где обозначены:

- блоки  $I_k$  — преобразователи текущего значения физической величины в электрический сигнал  $U_{ki}(t)$  каждого  $k$ -го канала. Это приемные устройства оптического или электромагнитного излучения с каждого  $i$ -го элемента разрешения наблюда-

емой зоны в координатах оптической или антенной системы  $k$ -го канала, например, в полярных координатах  $\psi_{ki}, \nu_{ki}, R_{ki}$  — углы и дистанция;

- блоки  $Z_k$  — накопители-сумматоры сигналов  $U_{kXYZi}$  в заданных координатах зоны наблюдения  $X, Y, Z$  (или  $\lambda, \varphi, H$ ). Важно отметить, что накопление информации целесообразно проводить для каждого элемента разрешения в заданных координатах зоны наблюдения, если происходит изменение взаимного положения аппаратуры наблюдения и наблюдаемой зоны, что естественно, например, для низкоорбитальных или геосинхронных космических аппаратов;

- блоки  $Z_k$  — обнаружители признаков полезных сигналов  $U_{nXYZi}$  для каждого элемента разрешения в заданных координатах. В простейшем случае — это пороговая обработка выделения полезного сигнала на фоне шума. В более сложных случаях — это выделение вектора наблюдаемых признаков сигнала (амплитуда, длительность, их изменение во времени, дисперсия, частотный спектр и т. д.). Входные сигналы, обозначенные пунктирными стрелками, означают запаздывание и возможно меньшую частоту поступления относительно сигналов входных сигналов предыдущего блока;

- блоки  $4_k$  — блоки оценки признаков полезных сигналов и принятие решения о наличии одного или нескольких явлений, объектов в координатах  $XYZ$ . В этих блоках вырабатывается информация, которая является продукцией верхнего уровня для измерительной части каждого  $k$ -го канала. Содержащиеся здесь решающие правила являются первой частью ядра **A=>B**;

- блок 5 объединяет информацию всех информационных каналов, решая задачу семантического отбора информации для передачи операторам на пост наблюдения;

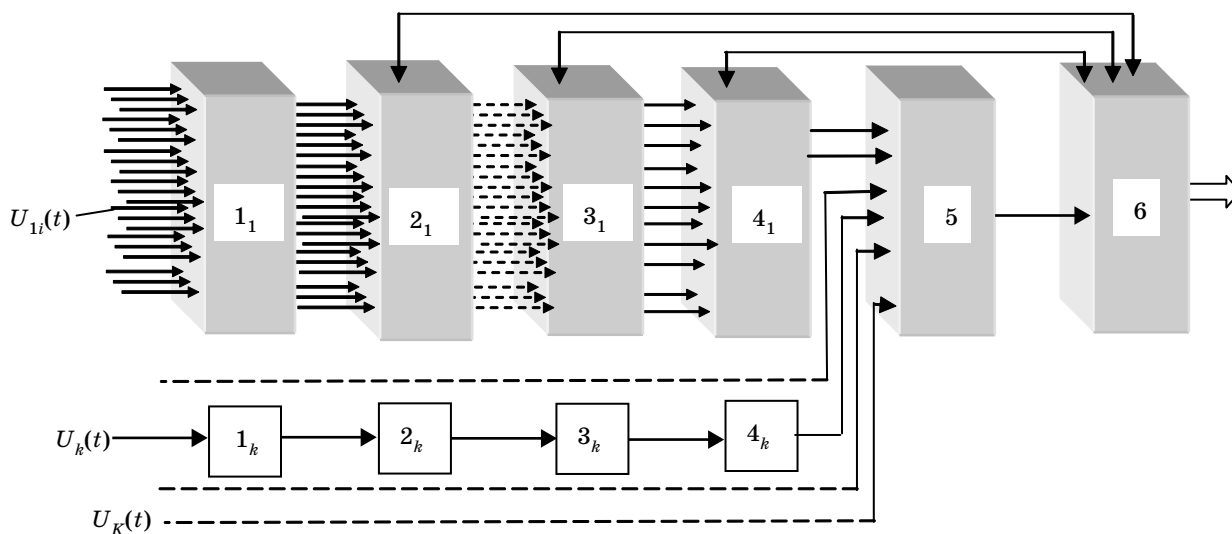
- блок 6 формирует пакет информации для передачи из главного уровня и более низких уровней, выбирая данные из блоков 4, 3 и 2, загружая ими пропускную способность канала связи.

Обработка информации в блоках 1–4 традиционна, возможности ее реализации многообразны и достаточно изучены для различных измерительных средств, обзорно-поисковых и охранных систем.

Новыми здесь являются части, обозначенные блоками 5 и 6, которые реализуют семантический отбор информации для передачи операторам. Они могут быть построены по принципу систем с искусственным интеллектом [7, 8].

Приведем один из возможных вариантов алгоритмов реализации блоков 5 и 6 (рис. 3).

При помощи оператора  $Q(Q_1, Q_2, Q_3)$  задается приоритетная последовательность всей возможной продукции  $I_m$  из общего ее числа  $M$ :  $Q_1 = [I_1 \dots I_m \dots I_M]$  устанавливает приоритет наименований продукции;  $Q_2 = [k_1 \dots k_k \dots k_K]$  определяет приоритет каналам получения информации;  $Q_3 = [T_1 \dots$



■ Рис. 2. Структурная схема системы обработки информации многоканального наблюдателя-измерителя

$T_m \dots T_M$ ] определяет интервалы времени  $T_m$  допустимой дискретности обновления данных. Последовательности  $Q_1$  и  $Q_3$  вводятся в постоянную память блока 5 и могут изменяться по команде оператора с поста управления. Начальная последовательность  $Q_2$  также вводится оператором как среднестатистическая, а изменяется по информации достоверности каждого  $k$ -го канала. Например, при наличии значительной облачности или тумана нет доверия оптическим каналам, а при большом уровне радиотехнических помех снижается приоритет радиолокационного канала. Свою значимость в приоритете каждый канал корректирует автоматически.

Каждый  $k$ -й канал на свой вход блока 5 выдает информацию в виде вектора  $S_k$ , который при наличии продукции содержит следующие компоненты:

- номер наименования  $I_{km}$  обнаруженной продукции;
- номера признаков, по которым найдена продукция  $I_{km}$ ;
- оценку достоверности обнаружения продукции  $I_{km}$  (оценка достоверности проводится, напри-

мер, по относительному превышению глобального экстремума над ближайшим по величине локальным экстремумом в оптимальных процедурах решающих правил [6]);

— координаты  $X_{km} Y_{km} Z_{km}$  обнаруженной продукции  $I_{km}$ ;

— характерные параметры продукции (например, площадь, объем, контраст и т. д.).

Продукция каждого  $k$ -го канала может содержать от 0 до  $M$  наименований, т. е.  $S_k = [S_{k1} \dots S_{km} \dots S_{kM}]$  (рис. 4, а и б).

В соответствии с приоритетами  $Q_1$  и  $Q_2$  из  $\sum_{k=1}^K S_k$

в блоке 5 формируется минимальная информация

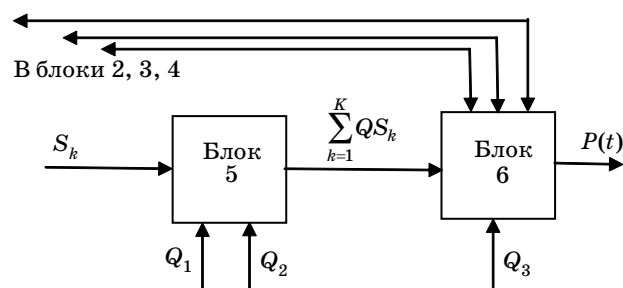
верхнего уровня о продукции измерителей  $\sum_{k=1}^K QS_k$

и направляется в блок 6.

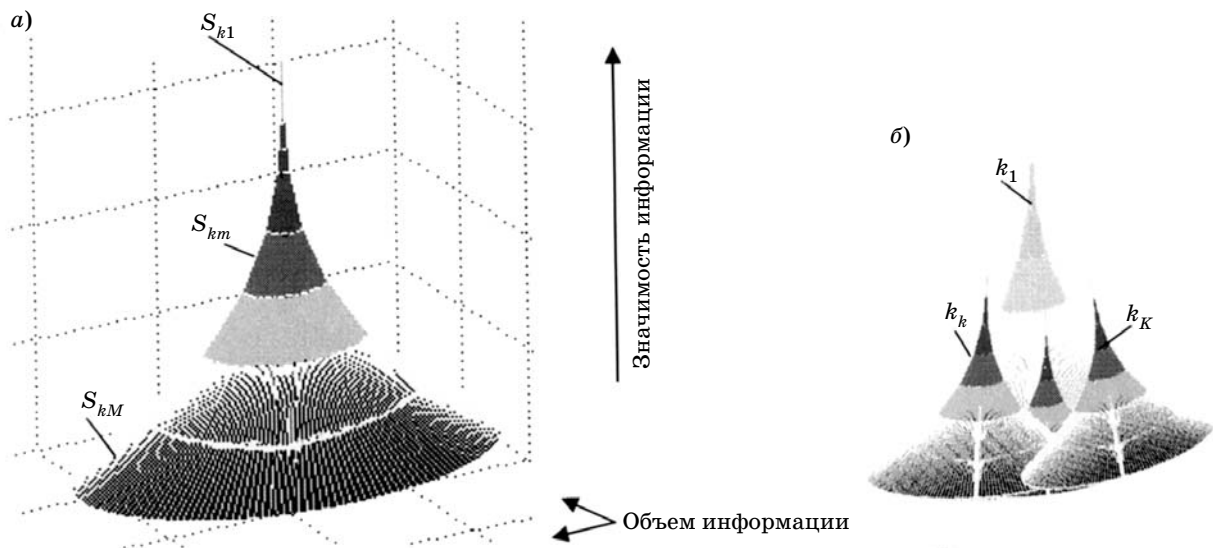
Таким образом, в блоке 5 реализуется вторая фаза ядра  $A \Rightarrow B$  и подготовка продукции  $P$  верхнего уровня.

В блоке 6 при помощи нормировки по данным  $Q_3$  происходит оценка требуемого времени для передачи информации верхнего уровня и сравнение ее с пропускной способностью канала связи. Если число обнаруженных наименований и их параметры, представляющие верхний уровень значимости, нормированные соответствующими значениями допустимых интервалов обновления  $Q_3$ , больше пропускной способности канала связи, происходит ограничение путем исключения наименований продукции нижних уровней приоритетов.

Обнаружение одновременно в наблюдаемой зоне всеми  $K$  измерителями всех  $M$  наименований продукции практически невозможно. Наиболее вероятная ситуация, когда в блок 6 поступает малое число наименований продукции с одного или двух



■ Рис. 3. Структурная схема алгоритмов реализации блоков объединения информации 5 и формирования выходного пакета 6



■ Рис. 4. Схематическое изображение объема и значимости продукции (1 ... т ... М): а — одного  $k$ -го канала; б — четырех каналов

измерителей. В этом случае резерв пропускной способности канала связи заполняется информацией более низкого уровня с каналов, где активизировалось ядро  $A \Rightarrow B$ , т. е. с блоков 4, 3, 2.

В случае отсутствия продукции во всех каналах происходит последовательный съем информации и передача его по линии связи человеку-оператору с блоков 2, 3, 4 каждого  $k$ -го канала. Это происходит до тех пор, пока не активизируется ядро  $A \Rightarrow B$  одного из каналов.

Таким образом, в блоке 6 реализуется последняя фаза ядра  $A \Rightarrow B$  и окончательное формирование продукции  $P(t)$ .

Элементы  $N$  в блоке 6 описывают логику дальнейшего отбора информации после реализации последней фазы ядра  $A \Rightarrow B$  (или его отсутствия за определенный период времени). Элементы  $N$  могут корректироваться по командам с поста управ-

ления по результатам приема и оценки оператором продукции  $P(t)$ .

### Заключение

Приведенный вариант семантического сжатия передаваемой информации можно трактовать как фильтрацию или отбор информации по приоритетам ценности информации и достоверности. Практически линия связи оперативно загружается наиболее полезной информацией. Семантическое сжатие позволяет на порядок и более снизить объем передаваемой информации, облегчив работу линии связи и людей-операторов дистанционного наблюдения [5].

Важно отметить, что семантическое сжатие не имеет ограничений по объему первичной информации и легко адаптируется к параметрам линии связи, внешним условиям и внешнему управлению.

### Литература

1. Frasier S. J., Camps A. J. Dual-beam interferometry for ocean surface current vector mapping // IEEE Trans. Geosci. Remote. Sens. Feb. 2001. Vol. 39. N 2. P. 401–414.
2. Ouchi K., Tamaki S., Yaguchi H., Iehara M. Ship Detection Based on Coherence Images Derived From Cross Correlation of Multilook SAR Images // IEEE Trans. Geosci. Remote. Sens: LETTERS. July 2004. Vol. 1. N 3.
3. Ouchi K., Wang H. Interlook Cross-Correlation Function of Speckle in SAR Images of Sea Surface Processed With Partially Overlapped Subapertures // IEEE Trans. Geosci. Remote. Sens. April 2005. Vol. 43. N 4.
4. Шаров С. Н. Некоторые особенности ориентации движущегося объекта по береговой черте // Изв. вузов. Сер. Приборостроение. 1994. № 4–5. С. 51–59.
5. Подоплёкин Ю. Ф., Соловьева В. В., Шаров С. Н. Обеспечение мониторинга земной поверхности космическим аппаратом на геосинхронной орбите // Изв. РАН. 2007. Вып. 1(51). С. 10–18.
6. Нариньяни А. С., Яхно Т. Г. Продукционные системы // Представление знаний в человеко-машинных и робототехнических системах / ВЦ АН СССР, ВИНТИ. М., 1984. С. 136–177.
7. Поспелов Д. А. Ситуационное управление: теория и практика. М.: Наука, 1986. 284 с.
8. Искусственный интеллект. Кн. 2. Модели и методы: Справочник / Под ред. Д. А. Поспелова. М.: Радио и связь, 1990. 304 с.

УДК 681.325

## СОВМЕЩЕНИЕ РАСТРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ В СИСТЕМАХ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

**А. А. Козлов,**

соискатель

**М. Ю. Литвинов,**

соискатель

**Н. В. Соловьев,**

канд. техн. наук, доцент

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

*Рассмотрены методы совмещения растровых изображений при их одновременном воспроизведении на экране дисплея. Приведены результаты экспериментов, показывающие, что наилучшее визуальное восприятие дает пиксельное совмещение.*

*We discuss some methods of matching raster images while displaying them on the monitor screen. The experiments' results show that the best visual perception is achieved through pixel matching.*

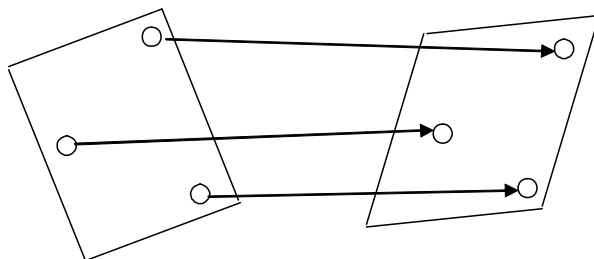
### Введение

При решении некоторых задач в системах технического зрения, виртуальной реальности и т. п. возникает необходимость совмещения нескольких растровых изображений, полученных различными способами. Например, нейрохирургу совмещение на экране дисплея изображений из атласа головного мозга с томографическими изображениями мозга пациента может помочь при операции. При проведении работ по реконструкции зданий специалистам удобно визуально определять положение скрытых объектов в стенах путем совмещения на экране переносного компьютера или специального шлема реальных изображений, полученных в видимом спектральном диапазоне, с графическими данными (чертежи, схемы) о расположении электрической проводки, водопроводных труб, телефонных линий или других изображений, дающих аналогичную информацию. Системы, решающие подобные задачи, принято называть системами дополненной или смешанной реальности [1].

В некоторых случаях необходимо совмещать реальные изображения одной и той же сцены, получаемые с видеокамер, работающих в разных спектральных диапазонах: в видимом спектре и, например, в инфракрасном диапазоне. Это может потребоваться для определения положения теплых или нагретых тел, скрытых некоторым препятствием (тонкой стенкой, туманом и т. п.).

### Исключение пространственных искажений

Для совмещения изображений, полученных с источников, расположенных в разных точках пространства, может потребоваться реперная привязка по характерным точкам. В зависимости от выбора вида преобразования совмещаемых изображений (аффинное или проективное) на каждом изображении необходимо найти соответствие между не менее чем тремя (четырьмя) реперами (рис. 1), по координатам которых и вычисляются параметры преобразования для совмещения путем решения системы уравнений [2]. Использование большего числа реперов позволяет компенсировать ошибки при определении их координат путем решения переопределенной системы уравнений методом наименьших квадратов. Обычно в качестве реперов используют либо специально наносимые



■ Рис. 1. Совмещение реперов на изображениях



на изображения, легко выделяемые метки, либо естественные мелкие фрагменты (пересечения дорог, характерные детали зданий или инженерных сооружений и т. п.). В некоторых случаях для нахождения соответствия между реперами на разных изображениях используется сканирующая подсветка узким лучом.

Из сказанного следует, что задача точного совмещения на экране дисплея изображений, полученной системой от двух источников, требует предварительной настройки системы, а также ее оперативной регулировки при существенном изменении параметров сцены. Если для получения совмещаемых изображений используется общий световой пучок, который после разделения попадает на две видеокамеры, работающие в разных спектральных диапазонах, то определение параметров совмещения изображений не требуется.

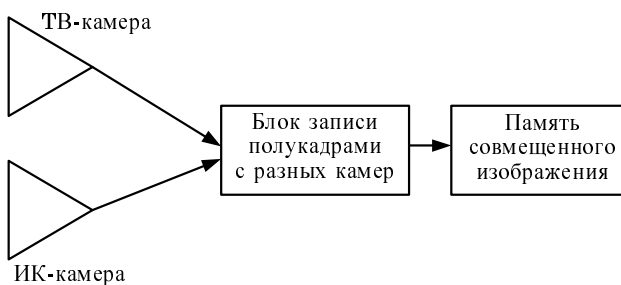
В динамике совмещение изображений может быть обеспечено с помощью последовательной записи кадров или полукадров в общую память согласно схеме, приведенной на рис. 2.

При воспроизведении видеопотока из таких изображений получаем картину, в которой оба изображения появляются с частотой в два раза меньше исходной, т. е. при частоте воспроизведения 24 кадра в секунду каждое изображение появляется с частотой 12 кадров в секунду.

Эксперименты показывают, что возникающая при этом на экране дисплея иллюзия мигания создает дискомфорт оператору. Увеличение частоты показа позволяет снизить отрицательное воздействие на оператора до приемлемого уровня, но требует повышения быстродействия системы и увеличения объема хранимой информации.

Еще одна проблема, возникающая при реализации совмещения изображений по приведенной на рис. 2 схеме, состоит в том, что при остановке видеопотока на экране дисплея или при необходимости распечатать совмещенное изображение на бумаге будет присутствовать либо первое, либо второе изображение, а совмещения, даже фиктивного, не будет.

На наш взгляд, для преодоления этой проблемы можно предложить несколько разных подходов.



■ Рис. 2. Совмещение изображений с записью полукадрами в общую память

### Методы совмещения изображений

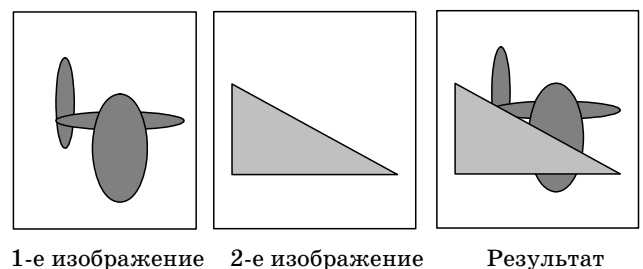
*Метод врезки* одного изображения в другое целесообразно применять в том случае, когда на одном из изображений, например на изображении, полученном в инфракрасном диапазоне, находятся небольшие, легко выделяемые фрагменты, а остальная часть изображения обнуляется. Полученное изображение попиксельно складывается с изображением от другого источника. Например, на инфракрасном изображении стены линии скрытой электропроводки легко выделяются пороговой бинаризацией, и полученное изображение можно попиксельно сложить с изображением стены, полученным в видимом спектральном диапазоне.

Недостаток такого подхода заключается в том, что на полученном в результате совмещения изображении фрагменты разных изображений частично или полностью замещают друг друга (рис. 3), что ухудшает визуальное восприятие видеопотока оператором при значительных размерах фрагментов.

В *методе построчной записи* результирующее изображение получается путем попеременной записи строк одного и другого изображения, например записи строк первого изображения в четных строках и второго изображения — в нечетных. Аналогично можно использовать последовательную запись столбцов. Основным недостатком данного подхода является известная из физиологии зрения способность человека хорошо выделять вертикальные и горизонтальные линии из повторяющихся наборов пикселей [3]. В результате восприятие совмещенного изображения ухудшается, поскольку внимание оператора отвлекается на фиктивные линии.

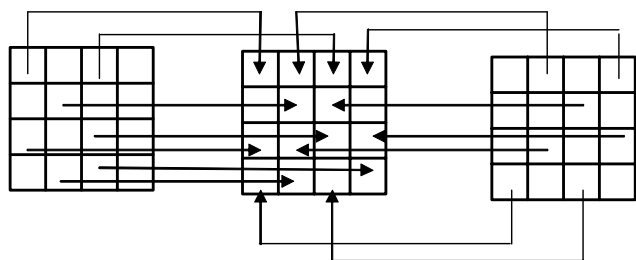
В *методе пиксельного совмещения* в каждой строке результирующего изображения последовательно смешиваются пиксели первого и второго изображений в шахматном порядке согласно схеме, показанной на рис. 4.

Обозначим через  $a_{ij}$  пиксель изображения А, находящийся в строке с номером  $i$  и столбце с номером  $j$ ;  $b_{ij}$  — соответствующий пиксель изображения В, а  $p_{ij}$  — пиксель результирующего изоб-



1-е изображение    2-е изображение    Результат

■ Рис. 3. Совмещение изображений методом врезки одного в другое



1-е изображение (А) Результат (Р) 2-е изображение (В)

■ Рис. 4. Фрагмент пиксельного совмещения в шахматном порядке

■ Индексация пикселей исходных изображений в результирующем кадре

	$i_0$	$i_1$	$i_2$	$i_3$	$i_4$
$j_0$	$a_{00}$	$b_{10}$	$a_{20}$	$b_{30}$	$a_{40}$
$j_1$	$b_{01}$	$a_{11}$	$b_{21}$	$a_{31}$	$b_{41}$
$j_2$	$a_{02}$	$b_{12}$	$a_{22}$	$b_{32}$	$a_{42}$
$j_3$	$b_{03}$	$a_{13}$	$b_{23}$	$a_{33}$	$b_{43}$
$j_4$	$a_{04}$	$b_{14}$	$a_{24}$	$b_{34}$	$a_{44}$

ражения Р. Тогда результирующее изображение Р формируется следующим образом:

$$P_{ij} = \begin{cases} a_{ij}, & \text{если } i + j \text{ — четное} \\ b_{ij}, & \text{если } i + j \text{ — нечетное} \end{cases}$$

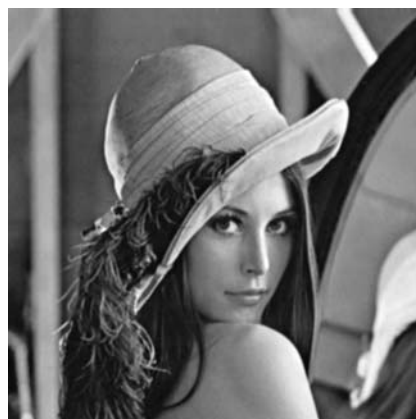
В таблице приведена нумерация пикселей для начальной части изображения Р.

На рис. 5 показаны результаты экспериментов по строчному и пиксельному совмещению изображений.

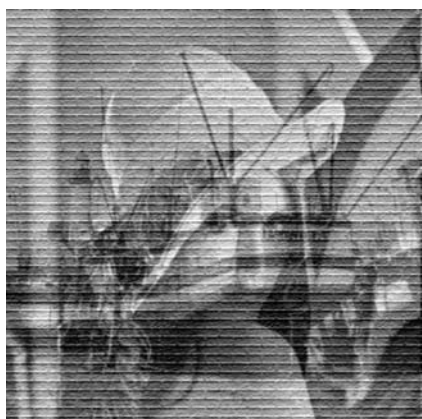
ражений, из которых видно, что наилучшее визуальное восприятие дает пиксельное совмещение.

### Заключение

Отсутствие вертикальных и горизонтальных линий из повторяющихся наборов пикселей, хорошо выделяемых зрением человека, делает пиксельное совмещение изображений наиболее комфортным при воспроизведении на дисплее и позво-



Исходные изображения



Совмещение по строкам



Совмещение по пикселям

■ Рис. 5. Результаты совмещения изображений

ляет получать качественную бумажную копию при печати.

Кроме того, многочисленные эксперименты показали, что для лучшего выделения изображений при описанном методе совмещения целесообразно принять меры для их дополнительного яркостного или цветового разделения. Например, в случае монохромных изображений сделать пер-

вое изображение темно-серым, второе — светло-серым.

При необходимости совмещения цветных изображений следует смещать палитру для одного изображения в сторону синего, для второго — в сторону красного цвета. Это позволит на одном изображении наблюдать более четкие картины, снятые в разных спектральных диапазонах.

### Литература

1. Компьютерное зрение / Л. Шапиро, Дж. Стокман: Пер. с англ. М.: БИНОМ, 2006. 752 с.
2. Соловьев Н. В. Методы коррекции пространственных искажений изображений плоских объектов в условиях действия полной аффинной группы преобразова-

ний // Информационно-управляющие системы. 2003. № 5. С. 7–11.

3. Марр Д. Зрение. Информационный подход к изучению представления и обработки зрительных образов: Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1987. 400 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 несут рекламодатели.*

УДК 004.94+681.51

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРНО-СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ, БЕЗОПАСНОСТИ И ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ

**И. С. Петухов,**

ассистент

**Н. Н. Смирнова,**

канд. техн. наук, доцент

Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д. Ф. Устинова

*Определяются требования к моделям, позволяющим анализировать надежность и безопасность сложных технических систем в аварийных ситуациях и выполнять эффективное переключение технических средств. Проводится анализ существующих подходов к построению таких моделей, рассматриваются их недостатки, описывается лишенный этих недостатков комплексный подход и разработанный впервые алгоритм поиска вариантов переключения.*

*The requirements for models that perform reliability and safety analysis of complex technical systems in emergency conditions and provide guidelines for effective switching of equipment are defined. The article includes an analysis of the known modeling approaches, reveals their disadvantages, describes a complex approach that doesn't have these disadvantages, and suggests an original brand new algorithm of equipment switching.*

### Введение

Современные промышленные предприятия — объекты энергетики, нефтегазовой отрасли, химической промышленности — представляют собой структурно-сложные технические системы (ССТС). Комплексный подход к обеспечению безопасности функционирования таких объектов приводит к тому, что вероятность возникновения аварий на них оказывается меньше, чем для относительно простых систем, но последствия возникновения таких аварий существенно более масштабны. Дальнейшее повышение безопасности функционирования ССТС возможно по четырем направлениям.

1. Повышение надежности отдельных элементов и их соединений. К сожалению, данное направление имеет серьезные ограничения, вызванные радикальным увеличением стоимости изготовления высоконадежных изделий.

2. Создание моделей прогнозирования отказов и своевременная (профилактическая) замена элементов в соответствии с рекомендациями, получаемыми в рамках этих моделей. Несмотря на то что данное направление достаточно активно развивается, до сих пор многие модели позволяют проводить моделирование только в предположении экспоненциального закона распределения (что приводит к завышению надежности элементов)

и не учитывают цензурированные наработки (что снижает точность и достоверность получаемых оценок). Указанные недостатки, приводящие к существенному искажению результатов моделирования, были успешно устранены при разработке рассматриваемой комплексной модели.

3. Создание моделей оценки надежности и безопасности функционирования ССТС в целом [1–5]. В рамках данного направления на сегодняшний день создано достаточно много моделей, но большинство из них позволяют использовать для расчетов только вероятности, закладываемые разработчиком или пользователем модели, не предоставляя возможности использовать расчетные вероятности, получаемые на основе статистики отказов элемента. Кроме этого, поскольку точный расчет показателей надежности и безопасности для технических систем большой размерности может занимать очень много времени, многие модели неприменимы из-за отсутствия алгоритмов приближенного расчета. Разработанная модель, в силу комплексного подхода к расчету надежности и безопасности, данными недостатками не обладает и позволяет достичь требуемого баланса между точностью и скоростью расчета благодаря исключению из рассмотрения некоторого подмножества множества кратчайших путей успешного функци-

онирования<sup>1</sup>, принадлежность путей к которому определяется на основе нескольких критериев. Это является одним из существенных достижений, поскольку становится возможным расчет показателей надежности и безопасности таких ССТС, которые в принципе не могли быть рассчитаны ранее за разумное (требуемое) время.

4. Создание моделей переключения технических средств ССТС, помогающих управляющему персоналу в принятии решений при возникновении чрезвычайных ситуаций [6, 7]. В рамках данного направления основной является задача минимизации последствий аварии в предположении, что она произошла. Тема моделирования переключений технических средств исследована менее полно, чем упомянутые выше, поэтому при решении задачи построения комплексной модели ССТС этому направлению уделялось особое внимание, что нашло отражение в разработанном впервые универсальном методе переключения технических средств, лишенном основных недостатков известных методов и методик.

Таким образом, все известные модели, развиваемые в рамках последних трех направлений, обладают рядом ограничений с точки зрения применимости и допущений с точки зрения точности выполняемых расчетов. Кроме этого, зачастую модели развиваются независимо друг от друга, и возникает проблема их объединения для комплексного подхода к безопасности ССТС. Поэтому создание более точных моделей с меньшими ограничениями по применимости, а также комплексных моделей безопасности ССТС является в настоящее время актуальной задачей.

Для решения перечисленных проблем разработана комплексная модель ССТС и выполнена эффективная программная реализация. Основные усилия были направлены на уменьшение времени выполнения расчетов при сохранении достаточной для практических применений точности [3, 7]. Результатом явилась возможность оперативно оценивать надежность и безопасность ССТС и решать задачи переключения технических средств в таких системах.

Для получения более полного представления о разработанной модели, ее достоинствах и недостатках следует рассмотреть лежащее в ее основе концептуальное понятие семантической объектной сети (подробнее описанное в работах [8–10]).

### Использование семантической объектной сети для моделирования ССТС

Классическим способом моделирования ССТС является ее представление в виде графа, вершинами которого являются элементы технической си-

<sup>1</sup> Кратчайший путь успешного функционирования — это конъюнкция элементов системы, ни одну из компонент которой нельзя изъять, не нарушив условия функционирования системы [1].

стемы, а дугами описываются физические соединения между элементами. Такой подход оказывается достаточно простым в реализации, но он не позволяет описывать свойства физических связей и различные логические зависимости между элементами, что приводит или к возникновению различных надстроек над моделью (в некоторой степени нивелирующих ее недостатки, но жестко связанных с самой моделью), или к созданию в значительной степени упрощенной модели. Применение семантических объектных сетей для моделирования ССТС позволяет создавать комплексные модели, лишенные перечисленных выше недостатков.

Вводимое понятие — семантическая объектная сеть — это способ описания семантики предметной области при помощи объектов и связей, описывающих взаимоотношения между объектами. Свойства объектов и связей в такой сети могут быть совершенно произвольными, зависящими только от конкретного типа объекта или связи. Все связи в такой сети являются двусторонними, могут описывать как физические, так и логические взаимоотношения между объектами.

Самой важной особенностью моделирования ССТС с использованием семантических объектных сетей является возможность описания логических связей между объектами. Это позволяет создавать максимально приближенные к реальности модели с минимальной привязкой к конкретике моделируемой системы. И, что еще более важно, эти модели оказываются крайне гибкими, наглядными и простыми в создании. Простота объясняется тем, что вся система представляется в виде набора схем, причем схемы могут создаваться несколькими людьми, наиболее компетентными в предметных областях, описываемых этими схемами. Ключом к наглядности моделей является иерархичность схем, позволяющая делить модель на части и рассматривать их по отдельности. Гибкость моделей достигается тем, что все ограничения, условия и зависимости описываются в рамках самой семантической объектной сети, а не посредством дополнительных надстроек. И все эти зависимости могут корректироваться, добавляться и удаляться конечным пользователем модели, а не ее разработчиком. Это позволяет минимизировать привязку к конкретной моделируемой системе и получить универсальное средство для решения различных практических задач.

Дополнительные преимущества моделирования ССТС с использованием семантических объектных сетей заключаются в возможности:

- 1) кэширования результатов, благодаря чему уменьшается время расчета в случаях повторяющихся вычислений характеристик отдельных элементов;
- 2) объединения различных по своей природе моделей (например, модели надежности и модели переключения технических средств);

3) создания нескольких визуальных представлений на основе одного описания.

Описание структуры системы — это достаточно длительный процесс, неизбежно сопровождающийся ошибками и неточностями. Разрабатываемые до настоящего времени модели не использовали в полной мере возможности по облегчению составления описания структуры системы и проверки его правильности, несмотря на рост производительности современных ЭВМ. Модель на основе семантической объектной сети позволяет описывать различные подсистемы ССТС по отдельности и поддерживает любую произвольную иерархию подсистем, упрощая тем самым описание, верификацию и модернизацию схемы структуры ССТС. Возможности задания графических изображений для различных типов элементов ССТС и изменения вида связей между ними улучшают зрительное восприятие разрабатываемой схемы системы.

### Моделирование переключения технических средств ССТС

Современные ССТС настолько сложны, их подсистемы и механизмы настолько технологически взаимосвязаны, что одному оператору физически невозможно осознать все происходящие в них процессы. В таких системах крайне актуальна проблема получения информации для принятия эффективных решений по переключению технических средств в аварийных ситуациях. Для ее решения необходима некоторая модель, позволяющая анализировать техническую систему в целом и определять следующую информацию:

- 1) перечень управляющих воздействий, предназначенных для локализации аварийных участков системы;
- 2) состояние технических средств системы после локализации аварийного участка;
- 3) ограничения на использование технических средств, обусловленные фактическим их состоянием после аварии;
- 4) перечень управляющих воздействий, предназначенных для перевода системы в целевое состояние.

Допустимое время получения информации в ряде случаев не должно превышать нескольких секунд, поэтому такая модель должна оперативно предоставлять всю необходимую информацию.

Существует множество работ, посвященных вопросам поддержки принятия решений при возникновении аварийных ситуаций в ССТС. Однако большинство из них рассматривают какой-то один процесс управления какой-либо одной системы или одно из мероприятий в рамках своей частной задачи или методики, например задачи эксплуатации ядерных реакторов, турбин, двигателей внутреннего сгорания, энергетических систем и систем, их обслуживающих, и т. д. Наиболее полно проблема получения рекомендаций по переключениям применительно к ССТС исследована

в работе [6], где рассматривается не частная задача улучшения живучести какой-либо одной корабельной системы, а общая задача управления обеспечением живучести комплекса из всех корабельных систем. Автором разработан алгоритм «Энергия», позволяющий в кратчайшее время выработать единое скоординированное по всей сложной технической системе решение на переключения в ней с целью локализации аварии и максимально возможного поддержания работоспособности технических средств при произвольной комбинации повреждений.

К сожалению, предложенное решение не лишено недостатков. Во-первых, все элементы в модели технической системы имеют только два состояния — работоспособно и неработоспособно. Совершенно не принимаются в рассмотрение различные режимы работы элементов, не учитывается то, что неработоспособных состояний может быть несколько (например, клапан может быть заблокирован в открытом или в закрытом положении, что оказывает большое влияние на получаемое решение).

Во-вторых, связи между элементами искусственно разбиваются на два множества — основные и резервные. При этом приоритеты ввода в действие резервных связей задаются достаточно жестко, и единственный способ их изменения — через таблицу варьирования приоритетов, требующую заполнения комбинаций возможных состояний различных связей, при которых происходит смена приоритета. Такое решение оказывается слабо масштабируемым для случая действительно больших систем, поскольку требует рассмотрения множества возможных комбинаций состояний связей.

В-третьих, приоритеты ввода в действие различных элементов задаются также достаточно жестко, и смена приоритетов производится в случае одновременной неработоспособности нескольких (заранее заданных) элементов. Такое решение также нельзя назвать масштабируемым, поскольку оно требует полного анализа возможных комбинаций повреждений.

Для устранения этих недостатков была разработана модель переключения технических средств, позволяющая проводить моделирование для всех классов систем, отдельные элементы которых удовлетворяют следующим условиям:

- 1) известно количество входов и выходов;
- 2) известны существенные характеристики входов и выходов;
- 3) непрерывное множество состояний элемента можно аппроксимировать относительно небольшим множеством дискретных состояний;
- 4) для каждого дискретного состояния известны значения характеристик входов и выходов (конкретные значения или диапазоны).

Разработанный метод моделирования переключения технических средств предполагает, что все элементы ССТС разделяются по типам, при этом тип задает допустимый набор свойств элемента



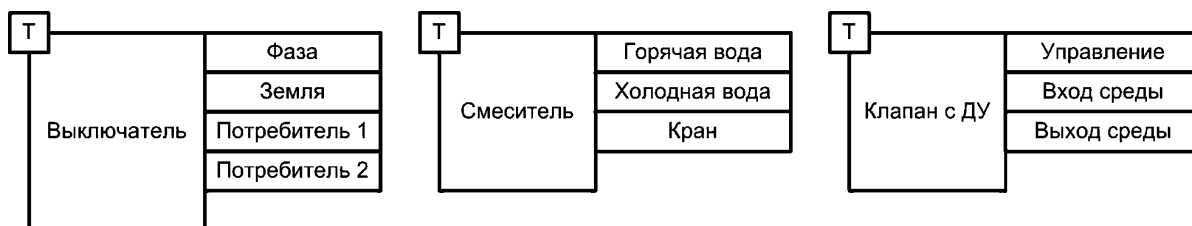


Рис. 1. Пример различных типов элементов

и допустимый набор портов (входов и выходов). Модель строится из типизированных элементов, а все связи между элементами регламентируются допустимыми наборами портов этих элементов. Например, обычный двухканальный электрический выключатель может быть задан как тип, имеющий два входных и два выходных порта, бытовой смеситель горячей и холодной воды — как тип с двумя входными и одним выходным портом, клапан топливной системы с дистанционным управлением (ДУ) заслонкой — как тип с двумя входными и одним выходным портом (рис. 1).

Каждый элемент может иметь любое число допустимых состояний  $S_o$ , каждое из которых уникально и задается множеством  $S_o = \{N, P\}$ , где  $N$  — название состояния;  $P$  — множество состояний портов элемента в состоянии  $S_o$ . Состояние каждого порта задается множеством  $S_p = \{D, S\}$ , где  $D$  — направление работы порта («вход», «выход», «двунаправленный»);  $S$  — состояние порта («задействован», «не задействован», «неопределенное состояние»). При необходимости увеличения реалистичности моделирования множество состояний порта  $S$  может быть расширено при обязательном соблюдении условий 3 и 4, предъявляемых к элементам. Как правило, такое расширение необходимо только для достаточно сложных элементов, составляющих небольшое количество от общего числа элементов системы, поэтому не оказы-

вает существенного влияния на время создания модели и собственно время моделирования переключения.

В качестве простейшего примера рассмотрим состояния элемента и состояния его портов для клапана с ДУ, в котором направление работы портов не меняется в зависимости от состояния (рис. 2).

Входами данного типа элемента являются «управление» и «вход среды» (отмечены символами «>>»), а единственным выходом — «выход среды» (отмечен символами «<<»). Задействованные порты обозначены знаком «+», незадействованные — знаком «-», а порты с неопределенным состоянием — знаком «?». Таким образом, например, значения портов в состоянии «закрит и управляем» могут быть интерпретированы следующим образом: «Управление клапаном работает, среда может подаваться или не подаваться на вход клапана, но на выходе клапана среды нет».

Допустимые переходы между состояниями показаны на рисунке при помощи стрелок. Например, если предположить, что в настоящий момент клапан находится в закрытом состоянии и управление на него не подается, а целевым состоянием клапана является «открыт и управляем», то из рисунка становится понятно, что такой переход возможен только через промежуточное состояние «закрит и управляем». При выполнении данного перехода состояния портов будут меняться, и в ко-

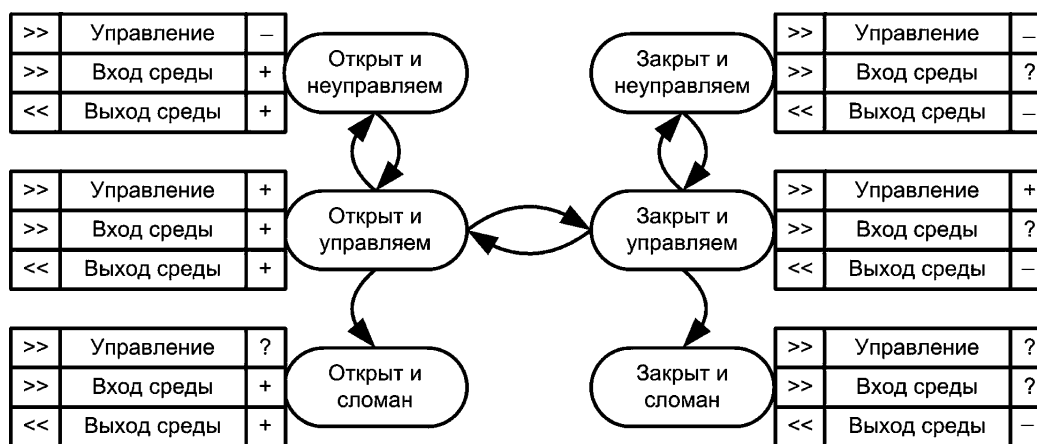
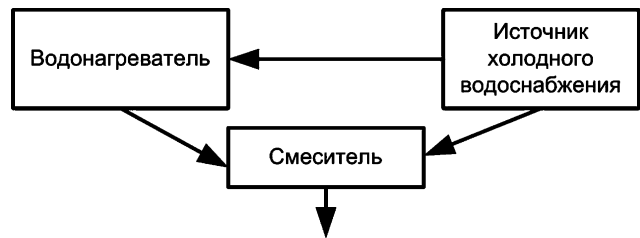


Рис. 2. Пример состояний элемента и его портов

нечном состоянии все порты клапана окажутся задействованными (если переход состоится).

В каждом состоянии элемента все порты обладают порядковым номером переключения, который позволяет изменять состояние портов элемента в строгом соответствии с реальным процессом. Например, для водонагревателя существует жесткое ограничение — не включать нагревательный элемент, пока не подается вода. Нумерация портов позволяет легко смоделировать эту особенность элемента. Для клапана с ДУ, приведенного на рис. 2, также должна быть задана такая последовательность, поскольку очевидно, что переключение клапана из открытого состояния в закрытое и наоборот возможно только после того, как будет обеспечено управление.

Для описания переходов между состояниями элемента использовалась теория конечных автоматов с дополнительно введенным понятием не прямых переходов. Непрямые переходы между состояниями — это такая последовательность одиночных (прямых) переходов, которая позволяет из исходного состояния достичь целевого. Каждый переход характеризуется приоритетом и затрачиваемым временем, а также может иметь ряд произвольных свойств, например рекомендацию эксперта по осуществлению такого перехода. Непрямых переходов между двумя состояниями может быть несколько, поэтому расширенная модель ко-

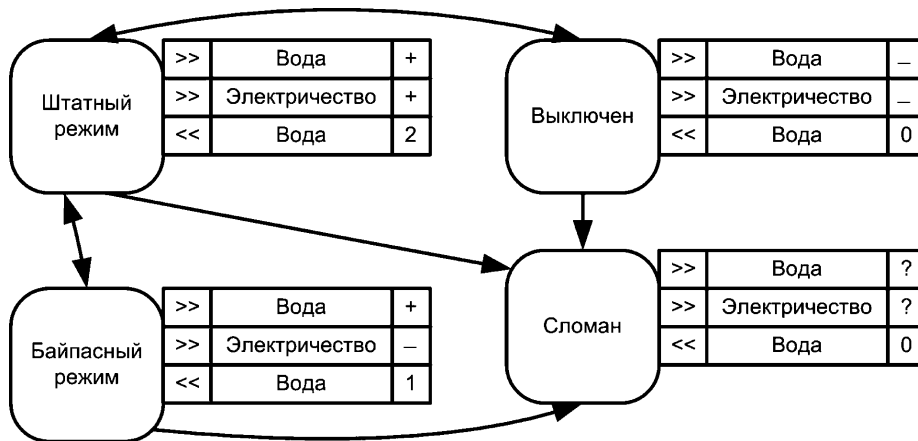


■ Рис. 3. Схема подключения водонагревателя

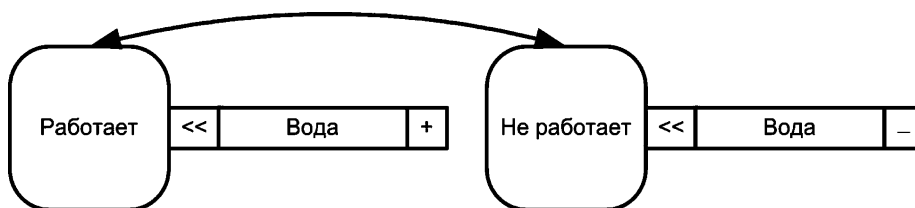
нечного автомата позволяет найти все такие переходы и упорядочить их по некоторому критерию (например, по количеству промежуточных состояний, по конъюнкции приоритетов одиночных переходов, по совокупному времени одиночных переходов или любому другому критерию, в том числе комплексному).

Рассмотрим более сложный пример, в котором множество состояний  $S$  некоторых портов элементов расширено и состоит более чем из трех базовых значений. Схема подключения электрического водонагревателя к бытовой системе водоснабжения (рис. 3) включает «источник» водоснабжения — водопроводную трубу, а также «потребителя» — смеситель для холодной и горячей воды.

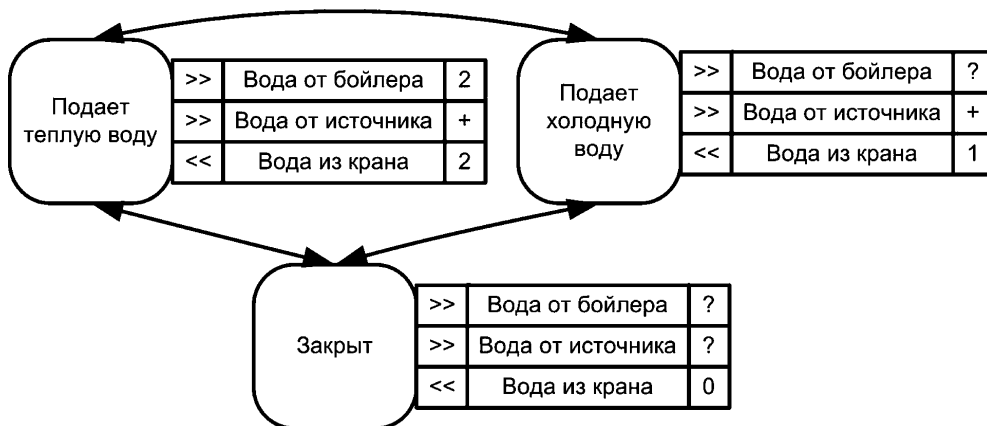
Состояния всех перечисленных на рис. 3 элементов и их порты показаны на рис. 4–6, при этом для состояний портов использованы следующие



■ Рис. 4. Состояния водонагревателя и его портов



■ Рис. 5. Состояния источника холодного водоснабжения и его портов



■ Рис. 6. Состояния смесителя и его портов

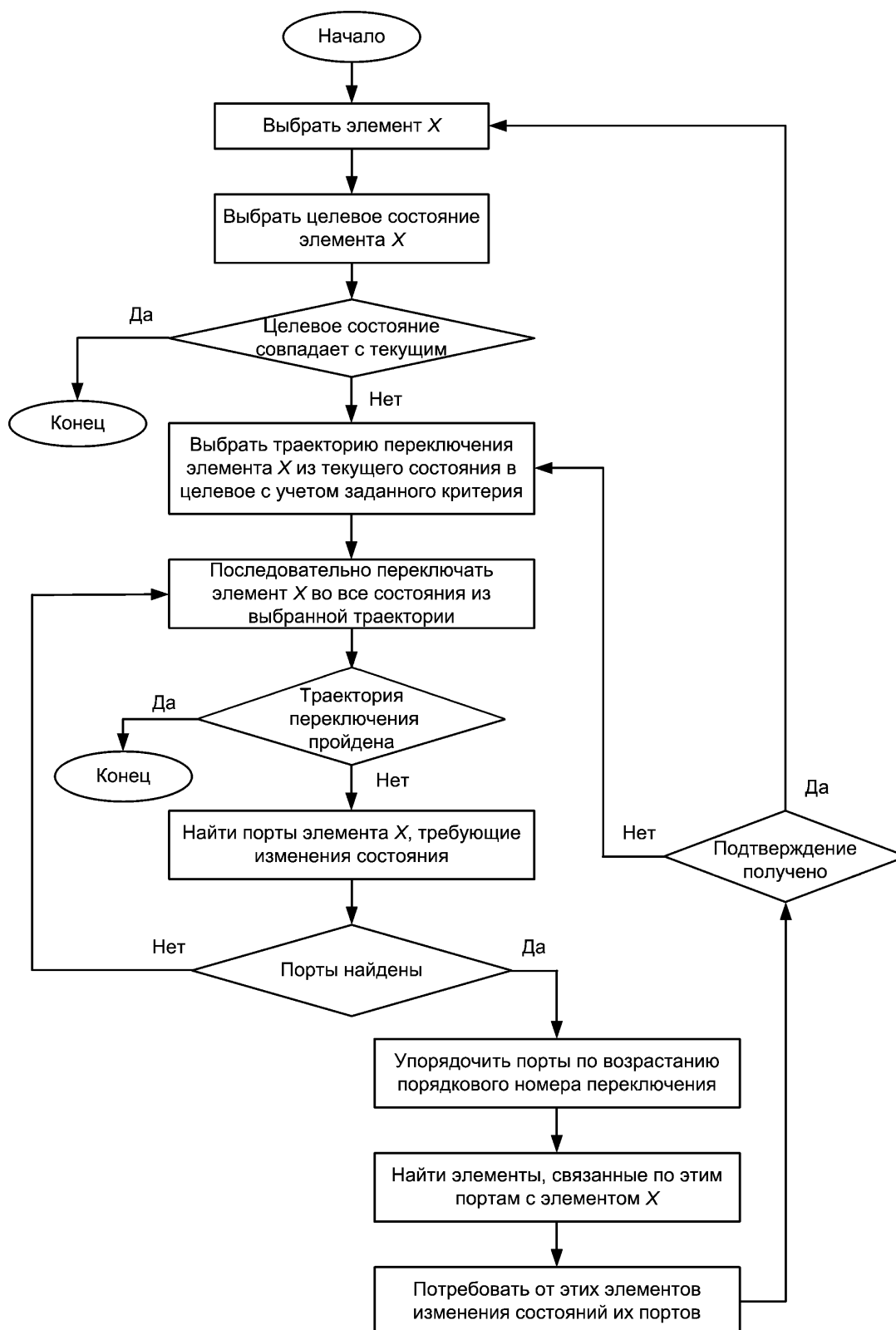
обозначения: «+» для задействованных портов, «-» для незадействованных, «?» для портов с неопределенным состоянием, «0» для портов без воды, «1» для портов с холодной водой, «2» для портов с теплой водой.

В качестве примера моделирования рассмотрим эту простую схему в предположении, что источник водоснабжения работает, водонагреватель выключен, а смеситель закрыт. Предположим, что необходимо обеспечить теплую воду из крана смесителя, и рассмотрим поведение модели в такой ситуации. Модель подает требование смесителю перейти в состояние, в котором порт «вода из крана» находится в состоянии «2». Смеситель находится в состоянии «закрит», указанный в требованиях порт находится в состоянии «0», поэтому он производит поиск всех возможных переходов (в том числе не прямых) в состояние, в котором порт «вода из крана» имеет значение «2». Из рис. 6 очевидно, что существует два таких перехода. Предположим, что в качестве критерия переходов используется количество промежуточных состояний, тогда будет выбран прямой переход в состояние «подает теплую воду». Из рис. 6 видно, что при этом переходе будут изменены состояния всех портов смесителя. Поскольку порт «вода из крана» является целевым, смеситель должен будет провести попытку переключения состояний для двух своих оставшихся портов. Если предположить, что в состоянии «подает теплую воду» порт «вода от источника» имеет наименьший порядковый номер переключения (наивысший приоритет), то смеситель в первую очередь произведет попытку переключения по этому порту. В рассматриваемом примере это будет означать обращение по этому порту к источнику холодного водоснабжения с требованием задействовать порт «вода» (см. рис. 3). Источник холодного водоснабжения выполнит это требование без собственных переключений, поскольку его выход уже находится в требуемом состоянии (см. рис. 5). После получения подтверждения от источника холодного водоснабжения

о возможности выполнения переключения смеситель обратится к водонагревателю с требованием перевести выходной порт «вода» в состояние «2». Водонагреватель имеет только одно состояние («штатный режим»), в котором это требование может быть выполнено (см. рис. 4), и для перехода в это состояние существует только один прямой переход. Для перехода в состояние «штатный режим» водонагревателю потребуется переключить состояния для двух входных портов — «вода» и «электричество». Как было упомянуто, первым должно быть выполнено переключение по порту «вода», иначе водонагреватель выйдет из строя. Для этого водонагреватель обратится к источнику холодного водоснабжения с требованием задействовать порт «вода» и получит подтверждение, поскольку источник уже находится в подходящем состоянии (см. рис. 5). Далее водонагреватель обратится к источнику электроэнергии с требованием задействовать выход «электричество» (см. рис. 4), и если он получит подтверждение, переключение будет выполнено.

Рассмотренный пример был намеренно максимально упрощен, чтобы показать основные принципы выполнения переключений. Для проведения полноценного моделирования схема на рис. 3 должна быть дополнена не только источником электроэнергии, но и необходимыми коммутационными элементами — водопроводными трубами, тройником для разделения потока воды от источника холодного водоснабжения, вентилем для перекрытия воды, электрическим выключателем для бойлера и электрическими проводами. Эти элементы представляют собой предельно простые устройства с минимальным набором состояний, поэтому их добавление не нарушит общей логики выполнения переключения.

При возникновении некоторой аварийной ситуации для рассмотренного примера последовательность переключений также достаточно проста. Предположим, что по каким-то причинам источник холодного водоснабжения выходит из строя и перестает подавать воду. В таком случае



■ Рис. 7. Обобщенный алгоритм поиска варианта переключения

для минимизации последствий аварии водонагревателю поступит требование перейти в состояние, в котором входной порт «вода» находится в состоянии «0». Из рис. 4 видно, что таких состояний два, и здесь начинает иметь значение критерий оценки переходов. С точки зрения приоритета переходов, интуитивно понятно, что более высокий приоритет должен иметь переход в состояние «выключен» (это определяется разработчиком модели), но на самом деле не все так однозначно. При выполнении переключений с целью минимизации последствий аварии пользователь может выбрать в качестве критерия оценки переходов время их выполнения, и в таком случае может быть выбран переход с меньшим приоритетом, но и с меньшим временем выполнения перехода. В рассматриваемом примере, если время перехода водонагревателя в состояние «сломан» будет меньше времени перехода в состояние «выключен», моделью будет рекомендовано сломать его, а не выключить. Для рассматриваемого примера такая ситуация может показаться абсурдной, но для сложных технических систем, представляющих опасность для окружающей среды и человека, такое поведение может быть оправдано.

Таким образом, разработанная модель переключения технических средств представляет собой множество взаимосвязанных типизированных элементов, и каждый элемент обращается к конечному автомату, соответствующему типу элемента, для поиска вариантов переключения, приводящих все порты элемента к требуемому состоянию. Для выбора инициирующего переключения для некоторого выбранного элемента модель предлагает следующие возможности:

- 1) получение текущего состояния выбранного объекта;
- 2) получение всех возможных состояний заданного объекта;
- 3) получение состояний всех портов для любого состояния заданного объекта.

После выполнения переключения модель позволяет получить перечень переключений, необходимых для обеспечения выбранного состояния заданного объекта или группы объектов.

Для описания возможных состояний элементов и их портов в разработанной модели использу-

ется семантическая объектная сеть [9]. Это позволяет упростить описание за счет использования сквозной технологии и дает возможность сравнительно простой доработки и адаптации модели. Обобщенный алгоритм поиска варианта переключения приведен на рис. 7.

Разработанная модель обладает хорошими показателями быстродействия. Тестирование на автоматически сформированных структурах систем с более чем 2 млн элементов показало, что в худших случаях, когда для выполнения требуемого переключения необходимо переключить все остальные элементы системы, время получения решения составляет менее 1 мин на современных ЭВМ. Для систем, состоящих из 20–40 тыс. элементов, время выполнения переключения составляет около 1 с в худшем случае; время получения решения для типового переключения составляет доли секунды.

К плюсам предлагаемого решения можно отнести возможность обеспечения целостности модели (за счет введения понятия «тип элемента» и учета портов элементов), достаточно высокую степень точности для рассматриваемой цели моделирования, хорошую гибкость и масштабируемость. Недостатком модели можно считать высокую трудоемкость ее создания по сравнению с моделями, учитывающими только два состояния элементов. Потенциальному пользователю модели необходимо принять решение, какая точность моделирования подходит для его задач, и выбрать соответствующую модель.

### Заключение

В современных автоматизированных системах и системах автоматизированного проектирования прослеживается тенденция все более полного использования возможностей ЭВМ. Увеличение сложности систем приводит к тому, что человек все чаще используется только для утверждения принятых решений, поскольку не в состоянии оперативно оценивать имеющиеся объемы информации о системе. Эта проблема особенно актуальна для ССТС, и разработанные модели надежности, безопасности и переключения технических средств представляют собой очередной шаг на пути к ее полному решению.

### Литература

1. Рябинин И. А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем. СПб.: Политехника, 2000.
2. Можяев А. С. Современное состояние и некоторые направления развития логико-вероятностных методов анализа систем // Теория и информационная технология моделирования безопасности сложных систем. СПб.: ИПМАШ РАН, 1994. Вып. 1. С. 23–53.
3. Петухов И. С. Автоматизированная система структурно-логической оценки показателей надежности и риска объектов энергетики // Проблемы информа-

- тики в образовании, управлении, экономике и технике: Сб. ст. IV Всерос. науч.-техн. конф. Пенза, 2004. С. 154–156.
4. Программный комплекс Relex. Relex Software Corp., <http://www.relexsoftware.de/>
5. Программный комплекс Risk Spectrum. Relcon AB, <http://www.riskspectrum.com/>
6. Ярошенко А. В. Методология координированных переключений (универсальные методы анализа больших сложных технических систем) / ВМА. СПб., 2004.

7. Петухов И. С. Алгоритм переключения технических средств сложных технических систем в аварийных ситуациях // Третьи Уткинские чтения: Сб. ст. Общероссийской науч.-техн. конф. Санкт-Петербург, 2007. Т. 2. С. 47–50.
8. Петухов И. С. Технология построения семантической объектной сети и ее отображение во внешнее хранилище данных // Инфокоммуникационные технологии в науке, производстве и образовании: Вторая Междунар. науч.-техн. конф. Ставрополь, 24–28 апреля 2006. С. 238–239.

9. Петухов И. С. Описание конечных автоматов с помощью семантической объектной сети // Искусственный интеллект в XXI веке. Решения в условиях неопределенности: IV Междунар. науч.-техн. конф. Пенза, 2006. С. 29–31.
10. Петухов И. С. Применение семантических объектных сетей при моделировании сложных технических систем // Актуальные вопросы ракетно-космической техники и технологий: Сб. тр. студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых БГТУ. СПб., 2007. Вып. 5. С. 192–193.

**III ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ  
«ПРОБЛЕМЫ РАЗРАБОТКИ ПЕРСПЕКТИВНЫХ  
МИКРО- и НАНОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ-2008» (МЭС-2008)  
6–10 октября 2008 г.**

**Организатор и проводящая организация**  
Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН

**Соорганизаторы конференции**  
Московский государственный институт электронной техники (Технический университет) ФГУП «НИИ микроэлектронной аппаратуры “Прогресс”»

**Направления работы конференции**  
Теоретические аспекты проектирования микро- и наноэлектронных систем (МЭС)

Системы на кристалле перспективной РЭА  
Опыт разработки цифровых, аналоговых, цифроаналоговых, радиотехнических функциональных блоков СБИС

Методы и средства автоматизации проектирования микро- и наноэлектронных схем и систем (САПР СБИС):

проектирование цифровых СБИС;  
проектирование аналоговых и радиотехнических функциональных блоков СБИС;  
проектирование СБИС со смешанными сигналами;

методы структурного синтеза аналоговых, цифровых и смешанных СБИС и СФ блоков;

системы на кристалле;  
наноразмерные схемы и системы;  
микромеханические системы;  
специализированные (стойкие к спецвоздействиям и т. п.) СБИС;

фоточувствительные СБИС;  
методы цифровой обработки информации;  
методы высокоуровневого моделирования;  
методы логического синтеза и логического моделирования в САПР СБИС;

методы электрического моделирования в САПР СБИС;

методы аналогового и смешанного поведенческого моделирования;

методы моделирования радиотехнических СБИС;

методы генерации моделей для САПР СБИС;  
методы автоматизации топологического проектирования в САПР СБИС;

методы приборно-технологического моделирования;

методы моделирования межсоединений;  
методы проектирования и моделирования новых приборных структур и схем наноэлектроники  
Выставка и презентация коммерческих продуктов  
Форум диссертационных работ

**Контрольные сроки**

Прием докладов до 15.01.2008

Рецензирование докладов и принятие решения о включении доклада в программу конференции до 15.03.2008

Информация авторам о включении доклада в программу конференции до 30.03.2008

Прием финальной версии доклада до 15.05.2008

Приезд участников 06.10.2008

Презентация коммерческих продуктов 06.10.2008

Выставка коммерческих продуктов 06–07.10.2008

Открытие конференции 7.10.2008

Заккрытие конференции 10.10.2008

Отъезд участников 10.10.2008

**Рабочий язык конференции**

Русский

**Дополнительная информация и справки**

124681, Москва, ул. Советская, д. 3, Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН, Оргкомитет МЭС-2008, Борискин Вячеслав Степанович

Тел.: 8-499-729-9569

Факс: 8-499-729-9208

Эл. почта: [boriskin@ippm.ru](mailto:boriskin@ippm.ru)

Организационный комитет



УДК 621.391

## МОДЕЛЬ И ПРОТОКОЛ ПЕРЕДАЧИ ВИДЕОДАНЫХ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ ПО БЕСПРОВОДНОМУ КАНАЛУ

**В. В. Башун,**

ведущий программист

**А. В. Сергеев,**

ведущий программист

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Решается задача передачи сжатого потока видеоданных высокого качества в реальном времени по беспроводному каналу Ultra Wide Band с изменяющейся пропускной способностью. Основная цель — создание совместной схемы сжатия и передачи видеопотока, которая обеспечит приемлемый уровень качества восстановленного изображения при строгом ограничении на используемую память и задержку при передаче. Для выбора оптимальных параметров сжатия и передачи предложена и исследована специальная модель, позволяющая задавать ограничение на допустимое число потерянных строк (в потоке) и максимизировать качество восстановленного изображения по критерию PSNR.

*A problem of real time high quality compressed video transmission over a variable UWB channel is being solved. The main goal is to create a joint compression and transmission scheme (jpeg progressive + ARQ protocol) that would provide an acceptable level of the restored video quality with severe requirements for the amount of memory used and transmission delay. To optimize the compression and transmission parameters, a new model that minimizes the number of dropped rows and maximizes the PSNR of reconstructed frames was proposed and developed.*

### Введение

Развитие современных беспроводных технологий (WiFi, UWB, WiMedia) позволяет передавать по беспроводному каналу значительные объемы информации на скоростях, сопоставимых с передачей по проводным каналам. Это дает возможность, в частности, отказаться от использования проводов для передачи видео в пределах дома или офиса (расстояния до 10 м прямой видимости). На текущий момент наиболее перспективной и проработанной технологией для решения таких задач является стандарт Ultra Wide Band (UWB) [1, 2], позволяющий достигать скорости передачи данных на физическом уровне до 480 Мб/с (реальные скорости передачи с учетом накладных расходов протокола передачи ~150–400 Мб/с [3]).

Для передачи видео высокого качества (HDTV 1080i) в реальном времени по каналу с ограниченной пропускной способностью необходимо предварительно сжимать видеопоток, так как передача несжатых видеоданных высокого качества требует скоростей передачи, на порядок превышающих достижимые на современном этапе (1,5 Гб/с). При этом необходимо учитывать изменение условий передачи, ошибки в канале и жесткие ограничения

на допустимую задержку передачи. С учетом реальных скоростей передачи и объема видеоданных видеокodeк должен обеспечивать степень сжатия в пределах 8–15 раз (см. ниже). Кодеки без потерь (например, J2k lossless) не обеспечивают требуемого уровня сжатия [4], поэтому в дальнейшем рассматривается только сжатие изображений с потерями. В статье представлена упрощенная версия алгоритма JPEG [5]. Однако описываемая модель/схема передачи работает с любым кодеком с потерями, поддерживающим прогрессивность (восстановление изображения ухудшенного качества при получении только части данных, например, JPEG 2000 [6]).

В системах передачи видеопотока в реальном времени кодирование и воспроизведение видео происходит с постоянной кадровой скоростью (FPS). При отсутствии данных на декодере на момент их показа (в силу ошибок или задержки при передаче) на экране отображается черный блок изображения. Для уменьшения вероятности такого события до приемлемого уровня возможно применять передачу сжатых данных с различными приоритетами и алгоритмы повтора передачи с подтверждением доставки (см. разд. «Протокол передачи»).

Следовательно, необходимо решать следующие задачи:

- создание системы передачи сжатого видео высокого качества в реальном времени по беспроводному каналу UWB с изменяющейся пропускной способностью;
- выбор оптимальных параметров сжатия и передачи ( $PSNR$ , размер пакета, размер блока данных).

Схожие проблемы сжатия и передачи видео в реальном времени через беспроводные каналы связи рассматривались в работах [7–9]. В работе [9] исследовалась передача видео по каналу с ошибками с наложением ограничения на задержку передачи. Здесь использовался адаптивный выбор квантователей дискретного косинусного преобразования (ДКП) для того, чтобы приспособиваться к изменяющейся пропускной способности канала. При этом блок данных либо посылался целиком, либо не посылался совсем, т. е. не использовались возможности прогрессивного кодера и передачи с приоритетами. В работе [7] анализировалась возможность использования помехоустойчивых кодов для обеспечения неравномерной защиты. В статье [8] рассматривалось совместное использование помехоустойчивого кодирования (RS-коды) для неравномерной защиты и повторной передачи (ARQ — Automatic Repeat Request). Во всех приведенных работах предполагается использование буфера на источнике и получателе.

В данной работе на схему передачи накладываются ряд дополнительных ограничений, которые не позволяют использовать напрямую результаты, полученные другими авторами [7–9]. Здесь считается, что модификация физического уровня и уровня доступа к среде (УДС) невозможна, и при обнаружении ошибки после декодирования на физическом уровне пакет уничтожается. Таким образом, нет возможности использовать дополнительный помехоустойчивый код на уровне выше УДС. Поэтому для борьбы с потерями пакетов используются только механизмы повторной передачи. Кроме того, предполагается, что применение сглаживающего буфера невозможно, поскольку существует жесткое ограничение на объем памяти. Вследствие этого невозможно, в частности, использовать адаптивные квантователи.

В дальнейшем рассматривается задача с буфером минимального размера для хранения одного блока данных. В качестве размера блока данных может быть выбрана часть кадра (например, строка доменов).

### Алгоритм сжатия TinyProgressive

При выборе кодека необходимо дополнительно учитывать следующие ограничения:

- Вход: видео формата HDTV 1080i/60 8bit — чересстрочный поток видео высокого качества с разрешением  $1920 \times 1080$  и постоянной кадровой скоростью 30 кадров в секунду.

- Качество изображения:  $PSNR > 37$  дБ — отличие восстановленного изображения от исходного должно быть незаметно для человеческого глаза.

- Задержка  $\rightarrow \min$  — для использования в приложениях реального времени (игры, конференц-связь, видео).

- Целевая степень сжатия — 10–15 раз.

- На кодере и декодере существуют строгие ограничения на объем используемой памяти (100 кбайт).

Малый объем памяти, а также жесткие требования по задержке исключают использование для сжатия методов компенсации движения или любой другой «сложной» обработки, которая приводит к появлению задержек или требует хранения кадров. Для видео HDTV 1080i хранение хотя бы одного кадра требует 6 Мбайт памяти, что является недопустимым. Поэтому сжатие данных должно производиться блоками небольшого размера («tiles»), например строками доменов.

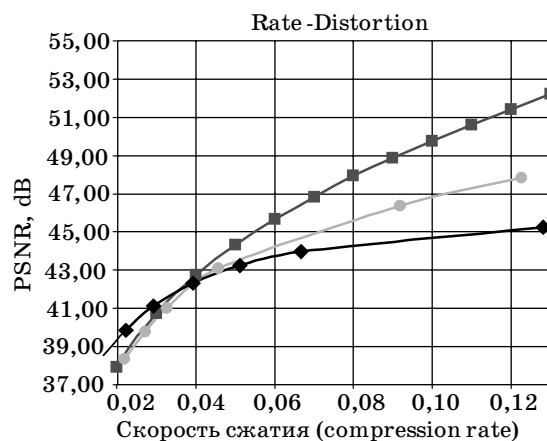
Дополнительные ограничения накладываются как результат необходимости передавать сжатый видеопоток через канал с ошибками:

- Для успешной передачи видеоданных кодер должен обладать свойством прогрессивности, т. е. должна быть возможность восстановления изображения ухудшенного качества при получении только части данных.

- Необходимо, чтобы сжатый видеопоток можно было разделить на несколько потоков с разными приоритетами.

Алгоритм сжатия TinyProgressive является упрощением прогрессивной версии алгоритма JPEG [5]. Будучи менее сложным в сравнении с другими современными алгоритмами сжатия (JPEG 2000, H.264), он обеспечивает хорошее соотношение сжатие-искажение (рис. 1), позволяет разделить низко- и высокоприоритетные данные и обладает свойством прогрессивности.

Сжатие происходит независимыми блоками данных по 8 строк пикселей (1 строка доменов), т. е.



■ Рис. 1. Зависимость  $PSNR$  от коэффициента сжатия: —■— — 1080 j2k tiling h16; —●— — 1080 ptiny tiling h8 YUV 444; —◆— — 1080 h.264 horizontal and vertical prediction 4x4

размер блока изображения  $8 \times 1920$  пикселей. Таким образом, для хранения входных данных нужно менее 50 кбайт памяти на кодере и декодере.

Алгоритм TinyProgressive состоит из следующих основных шагов [10]:

- YUV 444. Переход из цветового пространства RGB в YUV попиксельно, схема без прореживания.

- Домены. Блок  $8 \times 1920$  разбивается на независимые квадратные подблоки размером  $8 \times 8$  пикселей.

- ДКП. Подомненно применяется двухмерное ДКП размером 8. Производится декорреляция коэффициентов и концентрация средней энергии сигнала в старшем коэффициенте DC.

- Квантование. Скалярное квантование коэффициентов ДКП, квантователи — степени двух, могут быть реализованы операцией поразрядного сдвига.

- Змейка. Проквантованные коэффициенты в доменах вытягиваются в вектор.

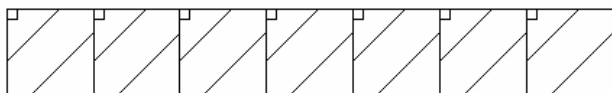
- Группировка проквантованных коэффициентов и энтропийное кодирование. Все проквантованные коэффициенты с одинаковыми номерами позиций из всех доменов объединяются в группы, называемые слоями коэффициентов (slices) (рис. 2). Число слоев и границы каждого слоя (номера коэффициентов, которые войдут в данный слой) являются параметрами алгоритма. Слои кодируются независимо, декодирование на приемнике каждого последующего слоя улучшает качество реконструируемого изображения, так как увеличивается число доступных декодеру отсчетов ДКП (рис. 3). Кодирование DC- и AC-коэффициентов производится по-разному.

### Кодирование DC-коэффициентов

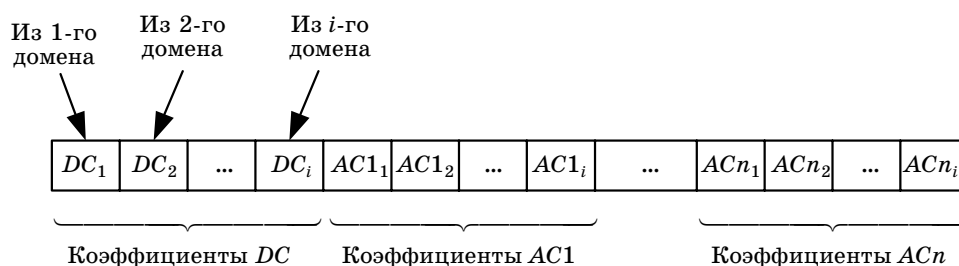
Разностный код и код Хаффмана. Разность соседних DC-коэффициентов кодируется кодом Хаффмана.

### Кодирование AC-коэффициентов

Кодирование длин серий. В каждой группе вычисляются длины серий нулей перед ненулевыми



■ Рис. 2. Разбиение на слои в доменах после ДКП



■ Рис. 3. Группировка AC-коэффициентов разных доменов по слоям

коэффициентами и записываются по правилу  $(R, S)(A), (R, S)(A), \dots, (R, S)(A)$ , где  $R$  — число нулевых коэффициентов;  $S$  — число бит, которыми можно закодировать число  $A$ ;  $A$  — значение ненулевого коэффициента.

Если число нулей в серии больше 15, то используется специальный символ блока нулей  $(ZB, ZR)$ , где  $ZR$  — число подряд идущих нулей;  $ZB$  — число бит, которыми можно закодировать  $ZB$ .

Каждая пара  $(R, S)$  и значение  $ZB$  кодируются предварительно рассчитанным кодом переменной длины Хаффмана. Значения  $ZR$  и  $A$  записываются в поток без изменений.

## Целевая функция

Для фиксированного набора квантователей (определяющего среднюю степень сжатия) необходимо выбрать параметры протокола (размер пакетов, число повторов) таким образом, чтобы качество восстановленного изображения (на декодере) было максимальным.

Традиционной метрикой оценки качества изображения является пиковое отношение сигнал/шум ( $PSNR$  [7, 8]). Однако среднее значение  $PSNR$  не дает полного представления о качестве восстановленного видео. Всегда возможна наихудшая ситуация, когда данные на декодере отсутствуют (вследствие задержки при передаче или ошибок в канале) и на приемнике не будет данных для отображения (т. е. в худшем случае, будет показан черный блок изображения). Будем называть такую ситуацию сбоем. Если число сбойных строк относительно невелико, потеря данных при передаче может незначительно повлиять на среднее значение  $PSNR$  кадра (а тем более, фильма). Однако визуально наличие черных строк очень заметно. Для учета такой ситуации необходимо ввести дополнительное ограничение — ограничение на вероятность сбоя ( $P_{out}$ ). Вероятность сбоя позволяет оценить, какой процент блоков данных (строк доменов) в фильме будет испорчен.

Задача оптимизации формулируется следующим образом. Необходимо:

- максимизировать среднее  $PSNR$  восстановленного изображения на декодере;
- обеспечить вероятность сбоя (outage probability) не выше заданного уровня.

### Протокол передачи

Основная задача протокола передачи — передача блока данных с задержкой, не превышающей некоторую постоянную величину, а также борьба с ошибками, возникающими при передаче. Для борьбы с ошибками при передаче применяются различные средства, основные из них — помехоустойчивое кодирование и схемы повторной передачи. При передаче по UWB возможно использование обоих методов. Напомним, что пакет уничтожается при обнаружении ошибки после декодирования на физическом уровне. Это означает, что необходимо бороться с пакетными ошибками (пакет либо будет доставлен безошибочно, либо не будет доставлен вовсе). Для борьбы с потерями пакетов используется возможность физического уровня отправлять данные с подтверждением доставки и повторная передача пакета в случае неудачи.

Применение алгоритма повторной передачи пакета в случае ошибки в канале совместно с помехоустойчивым кодированием на более низком уровне позволяет уменьшить  $P_{out}$ . Вместе с тем использование подтверждений приводит к увеличению избыточности протокола и времени простоя системы и, как следствие, к уменьшению реальной пропускной способности (из-за времени, необходимого для отправки подтверждения и дополнительных служебных интервалов). Вследствие жесткого ограничения на интервал времени, доступный для передачи блока данных, невозможно повторять посылку всего блока данных до бесконечности. Для того чтобы иметь возможность однократной повторной передачи строки целиком, необходимо обеспечить сжатие каждого блока данных в 20–25 раз (при работе на скорости 200 Мб/с). При таких уровнях сжатия (без использования компенсации движения) качество восстановленного изображения даже при отсутствии ошибок при передаче может стать неприемлемым.

Решением является обеспечение некоторого базового уровня качества восстановленного изображения путем гарантированной доставки

наиболее важных данных и попытка его улучшить за счет посылки дополнительных данных. Этого можно достичь, используя прогрессивные схемы сжатия (такие как Progressive JPEG и JPEG 2000).

С учетом размеров сжатой строки доменов все данные могут поместиться в 2–3 пакета UWB. Поскольку требуется обеспечить базовый уровень качества, целесообразно посылать первым пакетом высокоприоритетные данные, вторым — низкоприоритетные. В этом случае нужно за фиксированный интервал времени попытаться доставить все данные и при этом максимизировать вероятность доставки первого пакета. Поскольку UWB позволяет менять политику подтверждения и задавать число повторных передач в случае ошибки для каждого пакета независимо, схема протокола будет иметь следующий вид (рис. 4):

1. В начале окна передачи блока данных источник сообщения посылает высокоприоритетный пакет с запросом на подтверждение доставки (Imm-ACK).

2. Если не все ошибки в принятом пакете были исправлены, подтверждение не высылается. В этом случае первый пакет будет послан еще раз. Шаги 1–2 повторяются до тех пор, пока либо пакет не будет доставлен без ошибок, либо не закончится окно передачи.

3. Если ошибок при передаче не было (либо все ошибки были исправлены помехоустойчивым кодом на физическом уровне), узел-получатель высылает подтверждение доставки.

4. После получения подтверждения для первого пакета источник отправляет оставшийся пакет (один или несколько).

Нужно заметить, что низкоприоритетные данные посылаются не всегда. В случае, если высокоприоритетный пакет был доставлен не с первой попытки, может не остаться времени до конца интервала для отправки второго пакета.

Видно, что основным критерием оптимизации является максимальный размер первого пакета.



■ Рис. 4. Схема передачи видео, успешная передача

С одной стороны, он определяет базовый уровень качества восстановленного изображения (чем больше размер пакета, тем выше качество). С другой стороны, размер пакета задает максимально возможное число повторных передач и, следовательно, вероятность сбоя (чем меньше размер, тем больше количество возможных повторных передач). Для решения задачи оптимизации предложена модель системы сжатия и передачи, представленная ниже.

Заметим также, что описанная схема передачи может быть использована совместно с любой прогрессивной схемой сжатия (например, JPEG 2000 или TinyProgressive).

### Модель системы

Для выбора оптимальных параметров протокола введем ряд допущений.

**Д1.** Кодер использует любую прогрессивную схему сжатия, причем декодер может восстановить изображение, не получая все данные целиком. При получении только части данных будет восстановлено изображение ухудшенного качества. Также зафиксирован уровень ухудшения качества, описанный выше. В данной статье используется алгоритм TinyProgressive.

**Д2.** Используемые в UWB методы кодирования и передачи (такие как интерливинг, band hopping, OFDM и т. п.) успешно борются с пакетированием ошибок, вызванным замираниями в канале. Это позволяет сделать предположение о независимости и равномерном распределении между пакетами битовых ошибок после декодирования. Таким образом, канал и физический уровень UWB моделируются одним параметром — средним уровнем ошибки на бит (*BER*).

**Д3.** Для каждого блока данных изображения (строки доменов) известна зависимость качества по *PSNR* на декодере от размера принятых данных (*Rate-Distortion function*).

Функция зависимости *PSNR* от *Rate* (скорости кодирования) является монотонно возрастающей. В работе предполагается линейная зависимость, т. е. использовано простейшее приближение этой функции прямой, соединяющей точки с минимальным и максимальным уровнями качества. В данной модели вводится допущение, что существует некое максимальное значение *PSNR*, при достижении которого увеличение *Rate* не ведет к увеличению качества. Наличие верхней границы обусловлено использованием кодера с потерями.

**Д4.** Предполагается, что размер сжатой строки доменов  $l$  — дискретная случайная величина, равная числу байт в сжатой строке доменов. Эта случайная величина имеет сложный закон распределения и является суммой размеров слоев (групп коэффициентов). Если бы каждый домен изображения был случайным,  $l$  было бы суммой статистически независимых величин. В действитель-

ности, это не так, но для упрощения анализа будем полагать, что распределение величины  $l$  может быть вычислено на основе усеченного нормального закона с известными математическим ожиданием  $M$  и дисперсией  $\sigma^2$  и с границами ( $LB, RB$ ).

Границы ( $LB, RB$ ) могут быть получены эмпирически. Если  $F(l)$  — интегральная функция нормального распределения с параметрами  $M$  и  $\sigma^2$ , то функция усеченного нормального распределения

$$F_1(l) = \frac{F(l) - F(LB)}{F(RB) - F(LB)}.$$

Поскольку значения размеров строк могут принимать только целые значения, вероятность появления строки размера  $l$  байт равна  $\Pr\{L=l\} \hat{=} p(l) = F_1(l) - F_1(l-1)$ .

### Постановка оптимизационной задачи

При использовании описанного выше протокола передачи основным параметром, управляющим качеством принятого изображения, является размер высокоприоритетных данных. Скорость передачи считается фиксированной. В случае отсутствия ошибок увеличение размера первого пакета всегда ведет к увеличению базового уровня качества восстановленного изображения. С другой стороны, от размера первого пакета зависит число повторных передач. Увеличение размера пакета ведет к увеличению вероятности пакетной ошибки при том же уровне *BER*. Таким образом, увеличение размера пакета может приводить как к улучшению качества восстановленного изображения, так и к его ухудшению. Поэтому необходимо решить, сколько байт информации для блока данных будет передано в высокоприоритетном пакете, сколько — в низкоприоритетном.

Поскольку целевой функцией является максимизация среднего *PSNR* на декодере при наложении ограничения на  $P_{out}$ , для нахождения оптимальных размеров потоков необходимо решить следующую оптимизационную задачу:

$$\begin{cases} \text{avPSNR}_{\text{movie}} \rightarrow \max; \\ P_{out} \leq P_{out}^* \end{cases}$$

$$\text{avPSNR}_{\text{movie}} = 10 \log_{10} \frac{255^2}{MSE_{\text{movie}}},$$

$$MSE_{\text{movie}} = \frac{1}{N_{\text{rows}}} \sum_{i=1}^{N_{\text{rows}}} \text{rowMSE}_i,$$

$$\text{rowMSE}_i = \frac{1}{N_{\text{pixels}}} \sum_{j=1}^{N_{\text{pixels}}} e(\bar{x})^2,$$

где  $\text{avPSNR}_{\text{movie}}$  — среднее *PSNR* по фильму;  $P_{out}^*$  — ограничение на величину вероятности сбоя;

$MSE_{movie}$  — среднеквадратическая ошибка для фильма;  $rowMSE_i$  — среднеквадратическая ошибка для  $i$ -й строки доменов;  $N_{rows}$  — число строк доменов в фильме;  $N_{pixels}$  — число пикселей в строке доменов;  $e(\bar{x})^2$  — квадрат разности между исходным и восстановленным значением пикселя.

### Теоретическая оценка

С учетом перечисленных выше допущений, можно получить теоретическую оценку для оптимального размера первого пакета и сравнить ее с результатами имитационного моделирования при наложении ошибок на реальные видеопоследовательности. Для получения теоретической оценки введем следующие обозначения:

$MSE(l)$  — случайная величина, равная  $MSE$  блока данных размера  $l$  на декодере после передачи по каналу.  $MSE(l)$  может принимать следующие значения:

$$MSE(l) = \begin{cases} MSE_{min}, & \text{если доставлены все данные;} \\ MSE(l), & \text{если доставлена часть данных} \\ & \text{размера } l; \\ MSE_{max}, & \text{если ничего не доставлено,} \end{cases}$$

где  $MSE_{min}$  — среднее значение  $MSE$  сжатой строки доменов, может быть получено эмпирически. Среднее значение  $MSE$  при появлении черной строки (отсутствие данных на декодере)  $MSE_{max}$  при-

нято равным  $64^2$ :  $MSE(l) = \frac{255^2}{10^{10} \cdot PSNR(l)}$ , где  $PSNR(l)$

может быть получено с использованием допущения Д3.

Если допущения справедливы, то для реального фильма при увеличении длины видеопоследовательности, следовательно, и числа строк в ней  $N_{rows} \rightarrow \infty$ , значение среднеквадратической ошибки на фильм  $MSE_{movie}$  будет стремиться к математическому ожиданию  $E(MSE(l))$ , которое необходимо оценить.

С учетом допущения Д2 вероятность того, что в пакете размером  $l$  байт при передаче будут ошибки и он не дойдет до получателя, определяется по формуле  $PER(l) = 1 - (1 - BER)^{l \cdot 8}$ , где  $BER$  — вероятность ошибки на бит.

Основные параметры модели:

— размер окна  $T_{total}$  и размер сжатых данных (строки доменов)  $L1$ ;

— максимальное число попыток передачи высокоприоритетного пакета длины  $L1 - max\_tr\_num(L1)$ , оно зависит от размера окна  $T_{total}$ , размера данных  $L1$  и выбранной скорости передачи. Размер высокоприоритетного потока может принимать значения  $L1$  в диапазоне (0, 4095) байт (максимальный размер пакета в UWB 4095 байт);

—  $avail\_tr(l, L1)$  — число попыток передачи высокоприоритетного пакета размером  $L1$ , при котором остается время для посылки оставшейся информации размером  $l - L1$ .

Оценим вероятность сбоя  $P_{out}$  и математическое ожидание  $E(MSE(l))$ . При фиксированном значении  $L1$  возможны следующие ситуации.

I.  $LB < l < L1$ , в этом случае все данные помещаются в один пакет (см. пп. 1–2).

II.  $L1 < l < RB$  — данные посылаются в нескольких пакетах. В этом случае низкоприоритетные данные могут быть не отправлены, если высокоприоритетный пакет доставлен не с первой попытки (см. пп. 3–6).

Вероятность того, что высокоприоритетные данные успешно доставлены и есть время послать низкоприоритетные:

$$P_{1st\_packet} = 1 - PER(L1) \sum_{k=0}^{avail\_tr(l, L1)-1} PER(L1)^k.$$

Вероятность того, что высокоприоритетные данные доставлены и нет времени послать низкоприоритетные:

$$P_{1st\_packet\_only} = 1 - P_{1st\_packet} - PER(L1)^{max\_tr\_num(L1)}.$$

1.	Пакет доставлен (доставлены все данные)	$P_1 = \sum_{l=LB}^{L1} (1 - PER(l)^{max\_tr\_num(l)}) p(l)$	$MSE_1 = MSE_{min}$
2.	Пакет не доставлен (ничего не доставлено)	$P_2 = \sum_{l=LB}^{L1} PER(l)^{max\_tr\_num(l)} p(l)$	$MSE_2 = MSE_{max}$
3.	Все пакеты доставлены (доставлены все данные)	$P_3 = \sum_{l=L1}^{RB} P_{1st\_packet} \times (1 - PER(l-l)) p(l)$	$MSE_3 = MSE_{min}$
4.	Доставлены только высокоприоритетные данные, низкоприоритетные доставлены с ошибкой	$P_4 = \sum_{l=L1}^{RB} P_{1st\_packet} \times PER(l-l) p(l)$	$MSE_4 = MSE(L1)$
5.	Доставлены только высокоприоритетные данные, не было времени послать низкоприоритетные	$P_5 = \sum_{l=L1}^{RB} P_{1st\_packet\_only} p(l)$	$MSE_5 = MSE(L1)$
6.	Все пакеты не доставлены (ничего не доставлено)	$P_6 = \sum_{l=L1}^{RB} PER(L1)^{max\_tr\_num(L1)} \times p(l)$	$MSE_6 = MSE_{max}$



Тогда  $E(MSE(l)) = \sum_{i=1}^6 P_i MSE_i$ , вероятность сбоя

$P_{out} = P_2 + P_6$ , а оптимизационную задачу можно переформулировать следующим образом:

$$\begin{cases} E(MSE(l)) \rightarrow \min \\ P_{out} \leq P_{out}^* \end{cases}$$

Видно, что по приведенному критерию и с учетом допущений для выбора оптимального размера первого пакета необходимо лишь знать математическое ожидание и дисперсию размеров сжатых пакетов, а также определить уровень наклона кривой  $RD$ .

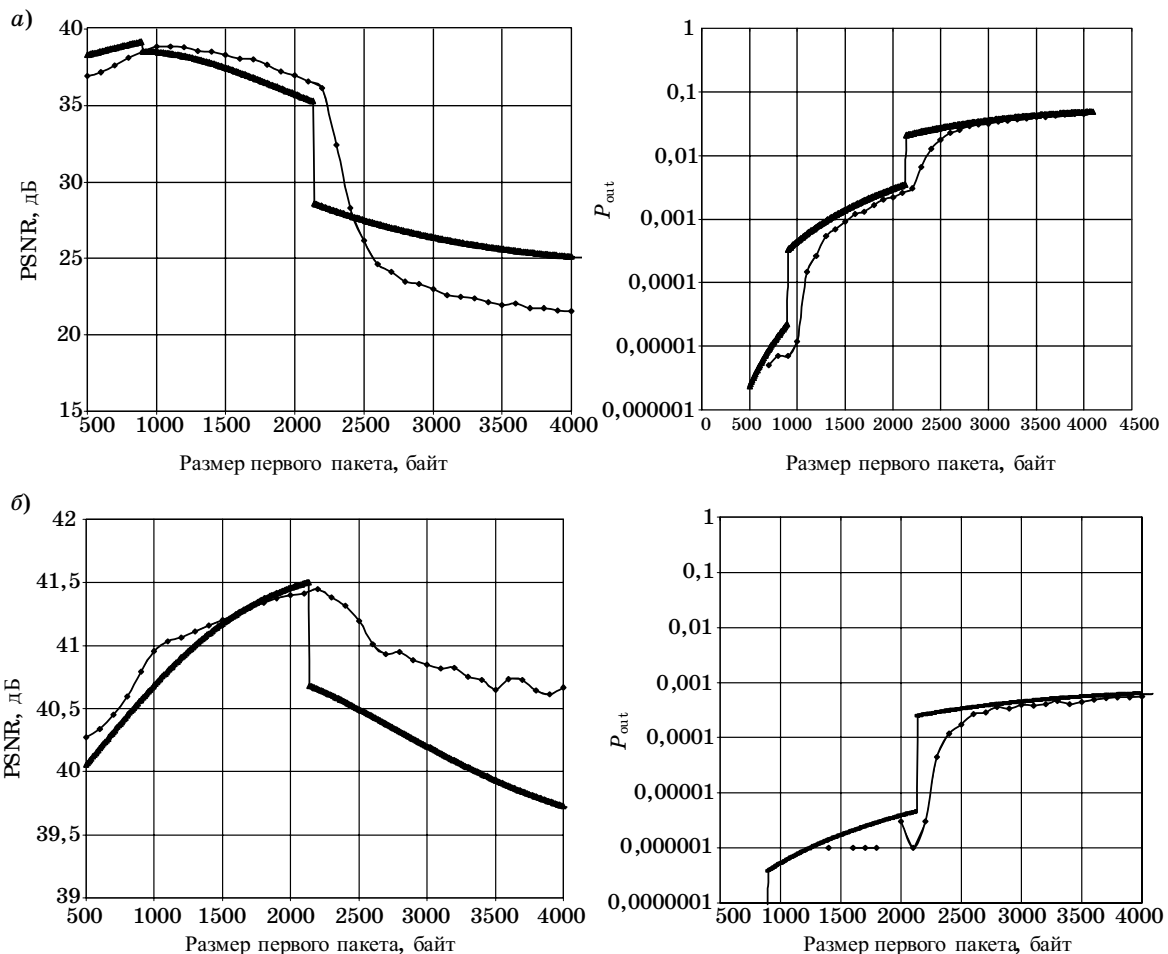
### Выводы

Для нахождения оптимальных параметров протокола была предложена описанная модель. Для проверки полученных на модели оптимальных значений параметров протокола проведена серия экспериментов с использованием реальных видеоданных, полученных в результате работы кодека

TinyProgressive. Заметим, что может использоваться и любой другой кодек с известным распределением размеров сжатых данных.

Реализована модель канала с UWB с ограничением на окно передачи видеоданных и равномерным распределением неисправленных ошибок. Сжатые данные на выходе кодера пакетируются, при этом высокоприоритетные данные объединяются в первый пакет, размер которого не превышает заданное ограничение ( $L1$ ). Модель УДС (MAC) уровня UWB используется для вычисления времени, необходимого для передачи пакета заданного размера.

В экспериментах использовалась видеопоследовательность из 100 различных ключевых кадров размером  $1920 \times 1080$ . В каждом эксперименте фиксировалась физическая скорость передачи UWB (которая определяет время, необходимое для передачи блока данных, а следовательно, и максимальный объем передаваемой информации), вероятность неисправленной битовой ошибки принималась постоянной (т. е. предполагалось, что канал находится в стабильном состоянии). Для



■ Рис. 5. Зависимость  $PSNR$  и  $P_{out}$  от размера первого пакета ( $L1$ ): а — для  $BER = 10e-5$ ; б — для  $BER = 10e-6$ ; —◆— моделирование передачи реального фильма через канал с ошибками; —▲— теоретическая модель

каждого эксперимента менялось ограничение на размер высокоприоритетного пакета. Результаты экспериментов и их сравнение с теоретической оценкой для различных скоростей передачи и уровня  $BER$  представлены на графиках (рис. 5, а, б).

Как видно из графиков, кривая изменения вероятности сбоя и среднего значения  $PSNR$  всегда имеет ступенчатый вид. Такой вид графиков объясняется следующим образом. Окно для передачи блока данных является фиксированным и зависит только от размера и кадровой скорости ( $FPS$ ) исходного изображения. Тогда при увеличении размера высокоприоритетного пакета ступенчато уменьшается возможное число повторных посылок пакета. При уменьшении числа повторных передач на единицу происходит резкое увеличение вероятности сбоя. Наоборот, если число повторных посылок не изменяется с увеличением пакета, происходит плавное увеличение вероятности сбоя. Ступенчатый вид графика вероятности сбоя сохраняется для любого уровня  $BER$ . Резкое увеличение вероятности сбоя может приводить к резкому уменьшению среднего уровня  $PSNR$ .

Важно отметить, что на интересующих участках ( $P_{out} < 10^{-3}$ )  $PSNR$  в пределах одной ступени ведет себя как неубывающая функция.  $PSNR$  на-

чинает убывать только при очень больших значениях вероятности сбоя ( $> 10^{-3}$ ).

Это позволяет сформулировать простое правило выбора размера высокоприоритетного пакета. Для заданного ограничения на вероятность сбоя можно найти соответствующую «ступеньку», а затем выбрать максимальный размер пакета на данной ступеньке. Например, для  $BER = 10^{-6}$  при ограничении на вероятность сбоя  $P_{out} < 10^{-7}$  размер высокоприоритетного пакета должен быть выбран равным 886 байт, что соответствует паре значений  $[P_{out}; PSNR] = [3,51 \cdot 10^{-7}; 40,5 \text{ дБ}]$ .

Можно заметить, что теоретическая оценка дает хорошее приближение работы реального кодека. Таким образом, указанная модель может использоваться для выбора оптимального размера высокоприоритетного пакета при условии корректного задания параметров модели: математического ожидания  $M$  и дисперсии  $\sigma$  распределения размеров сжатых данных, зависимости  $MSE$  блока данных на декодере от размера принятых данных (Rate-Distortion function), среднеквадратической ошибки  $MSE$  в случае отсутствия данных на декодере ( $MSE_{min}$ ). В работе все указанные параметры были получены эмпирически для большого числа изображений.

## Литература

1. Standard ECMA-368 High Rate Ultra Wideband PHY and MAC Standard. December 2005.
2. Ultra-Wideband (UWB Technology) Enabling high-speed wireless personal area networks. White Paper, 300982-002 US, Intel Corporation 2005 <http://www.intel.com/technology/comms/uwb/download/ultra-wideband.pdf>
3. Андреев С. Д., Семенов С. А., Тюрликов А. М. Методы оценки параметров радиоканала // Информационно-управляющие системы. 2007. № 4. С. 37–43.
4. Diego Santa Cruz et al. ISO/IEC JTC1/SC29/WG1 N1816 Coding of Still Pictures, An analytical study of JPEG 2000 functionalities. July 2000.
5. William B. Pennebaker, Joan L. Mitchel, JPEG still image data compression standard. NY, 1993.
6. JPEG 2000 Standard Part 1, Final Committee Draft v. 1.0. 16 March 2000.
7. Stankovic V., Hamzaoui R., Xiong Z. Live video streaming over packet networks and wireless channels // Proc. 13<sup>th</sup> Packet Video Workshop. PV2003. Nantes, April 2003.
8. Zhai F. et al. Rate-distortion optimized hybrid error control for real-time packetized video transmission // IEEE Transactions on Image Processing. 2006. N 15(1). P. 40–53.
9. Ortega A. Optimization techniques for adaptive quantization of image and video under delay constraints: Ph. D. Thesis Dept. of Electrical Engineering. Columbia University, Jun. 1994.
10. Уханова А. С. Прогрессивный алгоритм сжатия изображений на базе алгоритмов JPEG // 60-я студ. науч.-техн. конф. ГУАП: Сб. докл. / ГУАП. СПб., 2007.

УДК 621.391.1-681.3

# АДАПТИВНОЕ АРИФМЕТИЧЕСКОЕ КОДИРОВАНИЕ В СТАНДАРТЕ JPEG 2000

**Е. А. Беляев,**

аспирант

**А. М. Тюрликов,**

канд. техн. наук, доцент

**А. С. Уханова,**

студентка

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Представлен обзор контекстного моделирования, используемого в стандарте JPEG 2000. Описан способ модификации механизма адаптивной оценки вероятности появления символа, позволяющий учесть статистические особенности двоичных источников, соответствующих различным контекстным моделям, и тем самым повысить эффективность алгоритма.

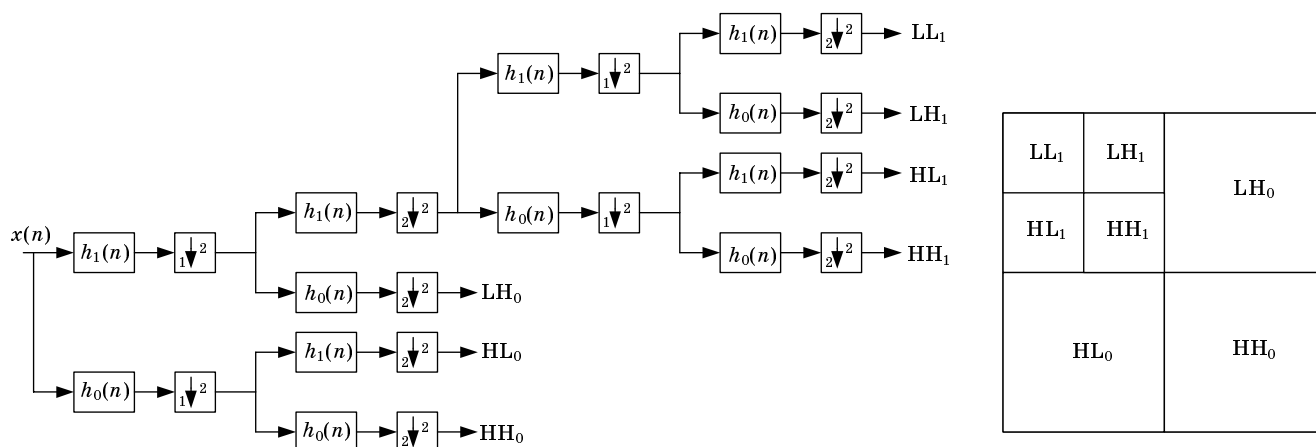
This is a review of context modelling used in the JPEG 2000 standard. We show how to modify the adaptive estimation mechanism of the probability of symbol appearance, taking into account the statistical peculiarities of binary sources corresponding to different context models and thus improving the algorithm.

## Введение

В последнее время стандарт JPEG 2000 [1–3] все более распространяется в качестве основного формата сжатия как изображений, так и видеопоследовательностей.

Схема кодирования, используемая в стандарте JPEG 2000, кратко может быть описана следующим образом. Исходное изображение разбивается на прямоугольные сегменты (tile), которые кодируются независимо. После преобразования цве-

тового пространства каждый сегмент изображения подвергается процедуре многоуровневого дискретного вейвлетного преобразования (discrete wavelet transform). Для этого используются низкочастотный  $h_0(n)$  и высокочастотный  $h_1(n)$  вейвлетные фильтры. При разложении сигнала сегмента изображения вначале выполняется разложение по строкам, а затем по столбцам. Результатом разложения являются 4 матрицы:  $HL_0$ ,  $LH_0$ ,  $LH_1$ ,  $LL_0$ , соответствующие фильтрации фильтром  $h_1(n)$  по строкам и по столбцам, фильтром  $h_1(n)$  по стро-



■ Рис. 1. Вейвлетное разложение изображения

кам и  $h_0(n)$  по столбцам, фильтром  $h_0(n)$  по строкам и  $h_1(n)$  по столбцам, фильтром  $h_0(n)$  по строкам и столбцам. Далее производится децимация (прореживание) полученных матриц по строкам и столбцам с коэффициентом 2. Затем матрица  $LL_0$  подвергается дальнейшему вейвлетному разложению [4]. Его результатом являются матрицы  $HL_1, HL_1, LH_1, LL_1$  (рис. 1). Такое разложение повторяется  $v$  раз. Результатом разложения является набор из  $3v + 1$  матриц уменьшающейся размерности.

Каждая из матриц разложения делится на блоки, которые кодируются независимо друг от друга при помощи контекстного адаптивного двоичного арифметического кодера.

### Арифметическое кодирование и контекстное моделирование

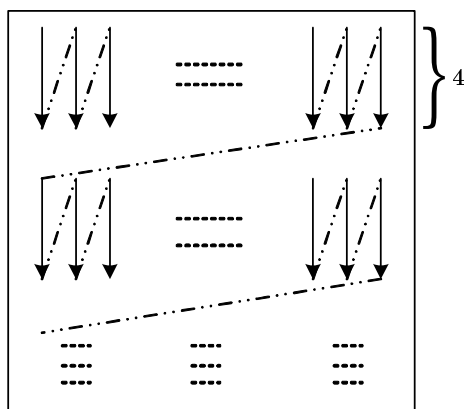
Коэффициенты матриц вейвлетного разложения представляются в двоичном виде. Все биты коэффициентов, относящихся к одному разряду, образуют битовую плоскость. Нумерация битовых плоскостей начинается с самого старшего разряда. Самая старшая битовая плоскость, в которой есть хотя бы один ненулевой коэффициент, является наиболее значимой.

Кодирование коэффициентов матриц разложения происходит на уровне битовых плоскостей, при этом каждая битовая плоскость кодируется с помощью арифметического кодера за три прохода: первый называется *significance propagation*, второй — *magnitude refinement* и третий — *clean-up*.

Кодирование плоскостей начинается с наиболее значимой битовой плоскости, для которой применяется только третий проход (*clean-up*), для всех остальных битовых плоскостей применяются все три прохода.

Битовые плоскости сканируются в порядке, показанном на рис. 2.

Каждому коэффициенту в блоке на этапе кодирования соответствует степень значимости (*significance state*). Степень значимости может прини-



■ Рис. 2. Порядок сканирования битовых плоскостей

$D_0$	$V_0$	$D_1$
$H_0$	$X$	$H_1$
$D_2$	$V_1$	$D_3$

■ Рис. 3. Формирование контекста для коэффициента  $X$

мать два значения: 1, т. е. коэффициент считается значимым, и 0, что говорит о том, что коэффициент незначимый. Первоначально все коэффициенты считаются незначимыми. После кодирования первого значимого бита (т. е. единицы) коэффициент становится значимым.

Каждому коэффициенту сопоставляется 8-разрядный «контекстный вектор», состоящий из степеней значимости восьми соседних коэффициентов (рис. 3). По сумме компонент вектора определяется номер контекста.

**Первый проход (significance propagation).** Данный проход включает в себя кодирование бит незначимых коэффициентов, которые имеют ненулевой контекст (табл. 1).

Если на данном проходе кодируется единичный бит, то степень значимости коэффициента, к которому этот бит относится, становится равной 1, после чего кодируется знак коэффициента.

**Кодирование знака.** Номер контекста при кодировании знака зависит от знака и значимости соседних коэффициентов по вертикали ( $V_0, V_1$ ) и по горизонтали ( $H_0, H_1$ ) (табл. 2, 3). Для указания зависимостей введем следующую функцию от двух аргументов:  $f(X_0, X_1)$ . Каждый аргумент представляет собой вектор  $X = \{S, \text{Sign}\}$ , где  $S \in \{0, 1\}$ ,  $\text{Sign} \in \{+, -\}$ .

После вычисления контекста кодируемый знак представляется как сумма по модулю 2 между действительным значением и предсказанным.

**Второй проход (magnitude refinement).** На данном проходе кодируются биты значимых коэффициентов. Номер контекста вычисляется по всем соседним коэффициентам. При этом делается различие между битом, стоящим сразу после первого значимого бита, и оставшимися битами этого коэффициента (табл. 4).

**Третий проход (clean-up).** На этом проходе кодируется наиболее значимая битовая плоскость, а также биты незначимых коэффициентов, для которых значение контекста во время первого прохода было равно 0. На этом проходе используются контексты первого прохода (табл. 1), а также еще два специальных контекста.

Если в столбце (см. рис. 1) четыре идущих подряд коэффициента кодируются на этом проходе и значения контекстов для них равны 0, тогда используется специальный контекст «Run-length». Если все коэффициенты остаются незначимыми (все 4 бита в столбце в текущей битовой плоскости

■ Таблица 1. Контексты для significance propagation

LL и LH			HL			HH		Номер контекста
$\sum H$	$\sum V$	$\sum D$	$\sum H$	$\sum V$	$\sum D$	$\sum(H+V)$	$\sum D$	
2	*	*	*	2	*	*	$\geq 3$	8
1	$\geq 1$	*	$\geq 1$	1	*	$\geq 1$	2	7
1	0	$\geq 1$	0	1	$\geq 1$	0	2	6
1	0	0	0	1	0	$\geq 2$	1	5
0	2	*	2	0	*	1	1	4
0	1	*	1	0	*	0	1	3
0	0	$\geq 2$	0	0	$\geq 2$	$\geq 2$	0	2
0	0	1	0	0	1	1	0	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0

\* — любое значение.

■ Таблица 2. Вычисление значений функции  $f(X_0, X_1)$  по соседним коэффициентам

$X_0$		$X_1$		$f(X_0, X_1)$
Значимость $S$	Знак Sign	Значимость $S$	Знак Sign	
1	+	1	+	1
1	-	1	+	0
0	*	1	+	1
1	+	1	-	0
1	-	1	-	-1
0	*	1	-	-1
1	+	0	*	1
1	-	0	*	-1
0	*	0	*	1

\* — любое значение.

■ Таблица 3. Вычисление контекста при кодировании знака

$f(H_0, H_1)$ для $H$	$f(V_0, V_1)$ для $V$	Номер контекста	Предсказанный знак*
1	1	13	0
1	0	12	0
1	-1	11	0
0	1	10	0
0	0	9	0
0	-1	10	1
-1	1	11	1
-1	0	12	1
-1	-1	13	1

\* 0 — положительное значение, 1 — отрицательное значение.

■ Таблица 4. Контексты для magnitude refinement

$\sum H + \sum V + \sum D$	Является ли бит первым после первого значимого бита?	Номер контекста
-	Нет	16
$\geq 1$	Да	15
0	Да	14

равны 0), то вместе с контекстом «Run-length» на арифметический кодер подается 0. Если хотя бы один из коэффициентов становится значимым на этом проходе (значение бита на текущей битовой плоскости равно 1), то на арифметический кодер подается 1, а далее кодируются еще 2 бита, которые сообщают о местоположении первой единицы в колонке. Так как вероятности этих двух бит равномерно распределены, то для их кодирования используется еще один специальный контекст «Uniform».

После того как позиция первого ненулевого бита определена, оставшиеся значения в колонке ко-

дируются так же, как на первом проходе с использованием тех же 9 контекстов.

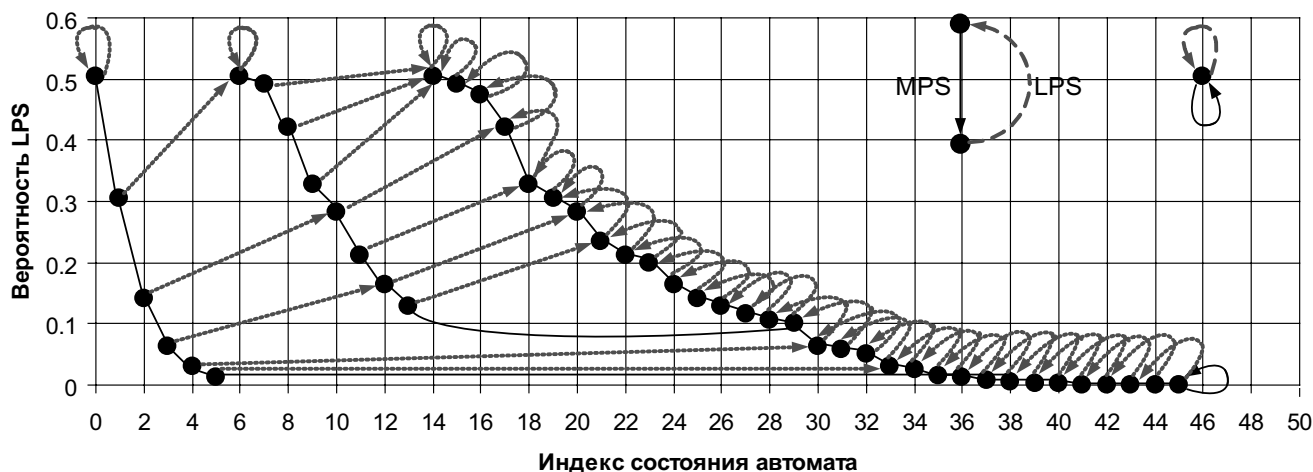
### Адаптивная оценка вероятности в арифметическом кодере

В стандарте JPEG 2000 используется 19 контекстных моделей. Для кодирования двоичных источников, соответствующих этим контекстным моделям, используется MQ-coder [1], в котором оценка вероятности появления символа на выходе источника вычисляется при помощи конечного автомата, заданного в виде таблицы состояний и переходов. Входные символы делятся на наиболее вероятные символы (Most Probable Symbol — MPS) и наименее вероятные символы (Least Probable Symbol — LPS). Каждое состояние автомата соответствует оценке вероятности наименее вероятного символа. В зависимости от значения входного символа  $x(t)$  (MPS или LPS) происходит переход из одного состояния автомата в другое. Подобная реализация не требует операций умножения/деления как при вычислении оценок вероятности, так и при непосредственно арифметическом кодировании. Конечный автомат, используемый в MQ-coder, показан на рис. 4. Здесь фактически реализованы три схемы адаптивной оценки, отличающиеся скоростью адаптации. Перед кодированием блока каж-

дой контекстной модели сопоставляется начальное состояние автомата. Такая процедура называется *инициализацией контекстов*.

В табл. 5 приведены инициализационные значения состояний автомата для контекстных моделей, используемых в стандарте. Из таблицы следует, что большинство контекстных моделей инициализируются состоянием «0». Это означает, что после инициализации оценка вероятности, соответствующая этим контекстным моделям, принимает значение, близкое к 0,5, и в начальные моменты времени используется схема с высокой скоростью адаптации. После кодирования некоторого количества двоичных символов происходит переход к схеме с более низкой скоростью адаптации, но с более высокой точностью оценки вероятности.

Описанная выше схема адаптивной оценки вероятности появления символа обладает высокой степенью эффективности, так как обеспечивает быструю адаптацию в начальные моменты времени и более точную оценку вероятности в последующие моменты. Однако эта схема не учитывает того, что статистические свойства двоичных источников, соответствующих различным контекстным моделям, могут существенно отличаться. Ниже описан подход, позволяющий частично учесть эти статистические отличия.



■ Рис. 4. Оценка вероятности в MQ-coder

■ Таблица 5. Инициализация контекстов

Контекст	Индекс состояния автомата	Вероятность LPS
«Uniform»	46	0,503937
«Run-length»	3	0,063012
0	4	0,030053
Все остальные	0	0,503937



**Адаптивная оценка вероятности при помощи «виртуального скользящего окна»**

В работах [5, 6] предложен алгоритм адаптивной оценки вероятности появления символа на выходе двоичного источника при помощи «виртуального скользящего окна». Оценка вероятности появления единицы для алгоритма «виртуального скользящего окна» определяется как

$$\hat{p}(t) = \frac{s(t)}{W^2},$$

где  $W$  — длина «виртуального скользящего окна»;  $s(t)$  — состояние конечного автомата, вычисляемое следующим образом:

$$s(t+1) = s(t) + \left\lfloor \frac{W^2 - s(t) + \frac{W}{2}}{W} \right\rfloor \text{ при } x(t) = 1;$$

$$s(t+1) = s(t) - \left\lfloor \frac{s(t) + \frac{W}{2}}{W} \right\rfloor \text{ при } x(t) = 0.$$

Таким образом, каждой контекстной модели можно сопоставить значение параметра  $W$ , наилучшим образом учитывающего статистические особенности источника. Кроме того, применение алгоритма «виртуального скользящего окна» позволяет отказаться от использования таблицы состояний и переходов. При выборе  $W = 2^i$ , где  $i$  — положительное целое число, вместо операции деления можно использовать операцию побитового сдвига.

**Практические результаты**

Алгоритмы сжатия видеоинформации сравниваются по двум основным параметрам: визуальному качеству декодированной видеопоследовательности и битовой скорости (число бит на выходе кодера в единицу времени). Для получения практических результатов алгоритм оценки вероятности, используемый в кодере и декодере JPEG 2000,

был заменен алгоритмом «виртуального скользящего окна». Для этого использовалась открытая реализация стандарта JASPER, версии 1.701.0.

Результаты были получены для первого кадра известных тестовых HDTV-видеопоследовательностей («riverbed», «rush hour», «station», «sunflower», «tractor») разрешением 1920×1080. Перед запуском кодера/декодера каждой контекстной модели  $i \in \{0, 1, \dots, 18\}$  сопоставлялась оптимальная длина окна  $W_{opt}(i)$ , которая выбиралась следующим образом. В процессе кодирования тестовой видеопоследовательности (в данном случае использовалась последовательность «tractor») для каждого двоичного символа с номером  $j$  источника, соответствующего контекстной модели с номером  $i$ , и для каждой длины окна  $W_l = 2^l$  вычислялись оценки вероятности кодируемого символа  $\hat{p}_j(i, W_l)$ . По завершении кодирования вычислялись оценки битовых затрат

$$\hat{R}(W_l, i) = - \sum_j \log_2 \hat{p}_j(i, W_l), \quad l = 3, 4, \dots, 10.$$

Для контекстной модели с номером  $i$  параметр кодирования устанавливался

$$W_{opt}(i) = \arg \min_{W_l} \hat{R}(W_l, i).$$

В представленных ниже таблицах приведено уменьшение битовой скорости (в процентах) относительно оригинальной версии кодера при сжатии без потери качества, в зависимости от размера сегмента, для которого выполняется вейвлет-преобразование. Табл. 6, 7 относятся к случаю инициализации контекстов перед кодированием каждого блока и каждого сегмента соответственно.

Как видно из табл. 6, 7, сопоставление каждому двоичному источнику параметра кодирования, учитывающего его статистические особенности, приводит к увеличению степени сжатия. При этом если инициализация контекстов выполняется значительно реже (табл. 7), то эффективность использования предложенной схемы адаптации повышается. Однако такой способ инициализации возможен только для случая сжатия без потери качества.

■ **Таблица 6.** Уменьшение битовой скорости при использовании алгоритма «виртуального скользящего окна» при инициализации контекстов перед кодированием каждого блока

Размер tile	riverbed	rush hour	station	sunflower	tractor
1920×16	0,76	0,76	0,74	0,84	0,85
1920×32	0,44	0,31	0,36	0,31	0,57
1920×64	0,39	0,20	0,32	0,14	0,56
1920×128	0,58	0,38	0,49	0,30	0,68
1920×256	0,68	0,45	0,58	0,40	0,76
1920×1080	0,73	0,48	0,60	0,42	0,77

■ **Таблица 7.** Уменьшение битовой скорости при использовании алгоритма «виртуального скользящего окна» при инициализации контекстов перед кодированием каждого сегмента

Размер tile	riverbed	rush hour	station	sunflower	tractor
1920×16	1,74	1,79	1,68	1,80	1,73
1920×32	0,93	0,85	0,86	0,81	1,04
1920×64	0,71	0,58	0,64	0,51	0,84
1920×128	0,75	0,57	0,64	0,44	0,86
1920×256	0,83	0,64	0,69	0,52	0,91
1920×1080	0,85	0,67	0,72	0,53	0,92

В отличие от схемы адаптации, входящей в MQ-coder, алгоритм «виртуального скользящего окна» может быть реализован без использования

таблицы состояния и переходов. При этом он является более предпочтительным с точки зрения эффективности кодирования.

### Литература

1. ITU-T and ISO/IEC JTC 1, JPEG 2000 Image Coding System: Core Coding System, ITU-T Recommendation T.800 and ISO/IEC 15444-1 (JPEG 2000 Part 1), 2000.
2. **Rabbani M., Joshi R.** An overview of the JPEG 2000 still image compression standard: Signal Processing: Image Communication 17. 2002.
3. **Adams M. D.** The JPEG-2000 still image compression standard. ISO/IEC JTC 1/SC 29/WG 1 N2412. September 2001. <http://www.ece.uvic.ca/mdadams> and distributed with the JasPer software.
4. **Mallat S.** A Theory of Multiresolution Signal Decomposition: The Wavelet Representation // IEEE Transactions on Pattern Anal. Mach. Intell. 1989. Vol. 11. P. 674–693.
5. **Belyaev E., Gilmutdinov M., Turlikov A.** Binary Arithmetic Coding System with Adaptive Probability Estimation // Virtual Sliding Window: Proc. of the 10<sup>th</sup> IEEE International Symposium on Consumer Electronics – ISCE'06. St.-Petersburg, Russia, 2006. P. 194–198.
6. **Беляев Е. А.** Использование «виртуального скользящего окна» при адаптивном арифметическом кодировании // Научная сессия ГУАП, посвященная Всемирному Дню авиации и космонавтики и 65-летию ГУАП: Сб. докл./ ГУАП. СПб., 2006.

УДК 621.396.67

## АНАЛИТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ НА ИЗЛУЧЕНИЕ АПЕРТУРНЫХ АНТЕНН

**А. Р. Бестугин,**

канд. техн. наук, доцент

**В. В. Горбацкий,**

канд. техн. наук, ст. преподаватель

**В. Н. Красюк,**

доктор техн. наук, профессор

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

*Исследовано влияние различных диэлектрических покрытий разных толщин и свойств на формирование диаграммы направленности излучения апертурных антенн. Исследования проводились для диэлектриков, располагаемых непосредственно в раскрыве антенны.*

*The influence of various dielectric coatings of different thickness and properties on the construction of the orientation diagram of aperture aerials radiation is investigated. A research was carried out for the dielectric coatings placed directly in the aperture of the aerial.*

Для защиты антенных систем летательных аппаратов от воздействия внешней среды применяют диэлектрические покрытия, обтекатели. Их форма при размещении на борту определяется конфигурацией антенн, местом их расположения и внешними обводами аппарата [1–3]. При заданной форме и прочностных характеристиках диэлектрической защиты необходимо такое решение электродинамической задачи, которое дает возможность минимизировать влияние диэлектрика на характеристики излучения антенн [4].

### Расчет влияния диэлектрического покрытия на диаграмму направленности апертурной антенны

Электромагнитная энергия, излучаемая или принимаемая антенной, частично проходит через диэлектрик, а частично поглощается и отражается им. Следует стремиться к достижению максимального коэффициента прохождения и к минимальным искажениям фазового фронта прошедшей волны. При расположении покрытия в дальней зоне поля излучения антенны защита представляет собой плоский слой полупроводящего материала, на который под углом падения  $\theta$  падает плоская электромагнитная волна (рис. 1) [5].

Формулы для расчета коэффициентов прохождения и отражения имеют вид:

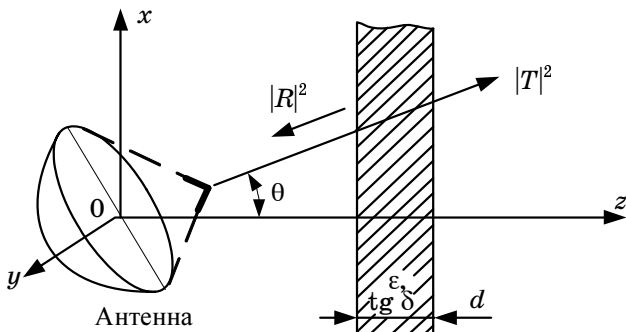
$$|T|^2 = \frac{\left[ \left(1 - |r|^2\right)^2 + 4r^2 \sin^2 \frac{\gamma d}{\cos \theta} \right] e^{-\frac{2\alpha d}{\cos \theta}}}{\left[ 1 - |r|^2 e^{-\frac{2\alpha d}{\cos \theta}} \right]^2 + 4|r|^2 \sin^2 \frac{\gamma d}{\cos \theta} e^{-\frac{2\alpha d}{\cos \theta}}}; \quad (1)$$

$$|R|^2 = \frac{|r|^2 \left[ \left(1 - e^{-\frac{2\alpha d}{\cos \theta}}\right)^2 \right] + 4 \sin^2 \frac{\gamma d}{\cos \theta} e^{-\frac{2\alpha d}{\cos \theta}}}{\left(1 - |r|^2 e^{-\frac{2\alpha d}{\cos \theta}}\right)^2 + 4|r|^2 \sin^2 \frac{\gamma d}{\cos \theta} e^{-\frac{2\alpha d}{\cos \theta}}}, \quad (2)$$

где коэффициент отражения Френеля соответственно для параллельной и перпендикулярной поляризации:

$$r = \frac{\epsilon \cos \theta - \sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta}}{\cos \theta + \sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta}}, \quad r_{\perp} = \frac{\cos \theta - \sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta}}{\cos \theta + \sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta}};$$

$\gamma = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\epsilon}$  — коэффициент фазы;  $\alpha = \frac{\pi \operatorname{tg} \delta \sqrt{\epsilon}}{\lambda}$  — коэффициент затухания;  $\lambda$  — длина волны в свобод-



■ Рис. 1. Расположение покрытия в дальней зоне поля излучения антенны

ном пространстве;  $\epsilon$  — относительная диэлектрическая проницаемость материала покрытия толщиной  $d$ ;  $\text{tg} \delta$  — тангенс диэлектрических потерь этого материала.

Для обеспечения максимального прохождения электромагнитной волны через покрытие (обтекатель) электрическая толщина его стенки должна быть равной или кратной половине волны в диэлектрике:

$$d = \frac{n\lambda}{2\sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta}}, \quad n = 1, 2, \dots$$

Потери заметно уменьшаются, если геометрическую стенку выбрать значительно меньше длины волны  $\lambda$ , т. е.  $d \leq 0,1\lambda$ . Но в этом случае покрытие (обтекатель) обладает низкой механической прочностью по сравнению с «полуволновым».

Выражения (1) и (2) являются основополагающими для аналитических оценок радиопрозрачности плоской диэлектрической защиты антенны, находящейся в дальней зоне поля излучения. В случае более сложной формы обтекателя необходимо пользоваться формулами (1) и (2) для фиксированных углов  $\theta$  сканирования луча относительно диэлектрика.

При расположении диэлектрических покрытий в области раскрытия антенны приведенные формулы неприемлемы. В этом случае имеет место сложное электродинамическое воздействие поля антенны с диэлектриком, появление многократных переотражений и поверхностных волн значительной интенсивности. Так, если антенна рассчитывается для излучения в направлении нормали к раскрытию, то энергия поверхностной волны будет определять потери и уменьшит коэффициент усиления антенны. Кроме того, она может быть причиной паразитных излучений, возникающих вследствие дифракции поля на покрытии конечных размеров.

При проектировании антенн с диэлектрическими покрытиями основной задачей является расчет их характеристик излучения. Задача о расчете поля антенны сводится к нахождению решения

уравнения Максвелла, удовлетворяющего граничным условиям и заданному распределению сторонних источников. Как правило, антенны с диэлектрическими покрытиями представляют собой различные волноводные излучатели, апертуры которых в проводящем экране покрыты слоем диэлектрика.

Антенну с диэлектрическим покрытием рассмотрим в виде излучающей апертуры в бесконечном проводящем экране, покрытом слоем диэлектрика (рис. 2).

Предположим, что электрическое поле в излучающей апертуре  $D$  направлено во всех точках вдоль оси  $y$ , т. е.  $E = E_y(x, z)$ . Метод преобразования Фурье от распределения поля в раскрытии антенны с последующим применением граничных условий на поверхности раздела сред часто применяется для исследования характеристики излучения апертур, расположенных на бесконечном проводящем экране, покрытом слоем диэлектрика.

Используя преобразование Фурье, записываем

$$E_y(x, z) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G(h, x) e^{ihz} dh, \quad (3)$$

где

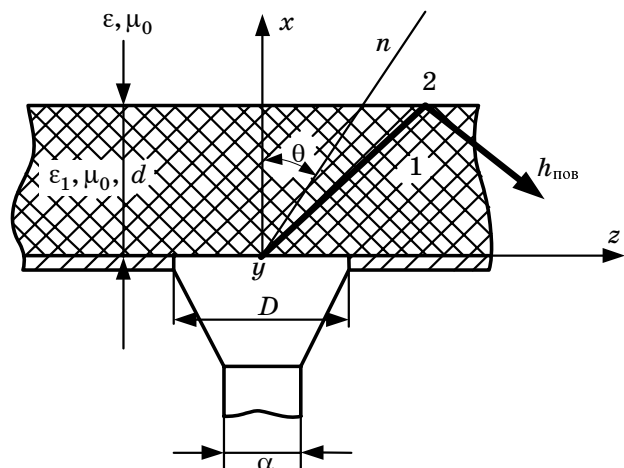
$$G(h, x) = \int_{-\infty}^{\infty} E_y(x, z) e^{-ihz} dz; \quad (4)$$

$h$  — постоянная распространения парциальной волны в направлении оси  $z$ .

Функция  $G(h, x)$ , определяемая выражением (4), удовлетворяет одномерному волновому уравнению

$$\frac{d^2 G(h, x)}{dx^2} + \beta^2 G(h, x) = 0, \quad (5)$$

где  $\beta = \sqrt{k^2 - h^2}$  — постоянная распространения парциальной волны внутри слоя.



■ Рис. 2. Антенна с диэлектрическим покрытием

Постоянная распространения парциальной волны над слоем  $\beta_0 = \sqrt{k_0^2 - h^2}$ .

Волновое число свободного пространства  $k_0 = \omega\sqrt{\mu_0\epsilon_0} = \frac{\omega}{c}$ .

Волновое число для слоя  $k = \omega\sqrt{\mu_0\epsilon_0\epsilon}$ , где  $\epsilon$  — относительная диэлектрическая проницаемость слоя;  $\mu_0$  — магнитная постоянная.

Граничные условия для рассматриваемой задачи представляются в виде  $G(h, 0) = G_0(h)$  при  $x = 0$ ;

$G$  и  $\frac{\partial G}{\partial x}$  непрерывны при  $x = d$ . Здесь  $G_0(h)$  — преобразование Фурье от функции распределения электромагнитного поля в излучающей апертуре.

Решение волнового уравнения (5) для областей 1 и 2 рассматриваемого пространства (см. рис. 2) можно представить в виде

$$G_1(h, x) = B(h)e^{i\beta x} + C(h)e^{-i\beta x}; \quad (6)$$

$$G_2(h, x) = A(h)e^{i\beta_0 x}. \quad (7)$$

Подстановка выражений (6), (7) в граничные условия позволяет написать

$$G_0(h) = B(h) + c(h);$$

$$A(h)e^{i\beta_0 d} = B(h)e^{i\beta d} + C(h)e^{-i\beta d};$$

$$A(h)e^{i\beta_0 d}\beta_0 = B(h)e^{i\beta d}\beta - C(h)e^{-i\beta d}\beta.$$

Из полученных соотношений путем несложных преобразований определяем величины  $A(h)$ ,  $B(h)$ ,  $C(h)$ , необходимые для расчета электрического поля по формуле (3):

$$A(h) = \frac{G_0(h)e^{-i\beta_0 d}}{\cos\beta d - i\frac{\beta_0}{\beta}\sin\beta d}; \quad (8)$$

$$B(h) = \frac{\beta + \beta_0}{2\beta} \frac{G_0(h)e^{-i\beta d}}{\cos\beta d - i\frac{\beta_0}{\beta}\sin\beta d}; \quad (9)$$

$$C(h) = \frac{\beta - \beta_0}{\beta} \frac{G_0(h)e^{i\beta d}}{\cos\beta d - i\frac{\beta_0}{\beta}\sin\beta d}. \quad (10)$$

Подстановка выражения (8) в (7) и (3) позволяет найти электромагнитное поле в свободном пространстве:

$$E_y(x, z) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{G_0(h)e^{-i\beta_0 d}}{\cos\beta d - i\frac{\beta_0}{\beta}\sin\beta d} e^{i(\beta_0 x + hz)} dh. \quad (11)$$

При определении поля излучения антенн, защищаемых от внешних воздействий диэлектрическими покрытиями, необходимо учитывать возникающие поверхностные электромагнитные волны на таких покрытиях. Причем при достаточно большой электрической толщине диэлектрика поверхностные волны могут включать в себя до 50% подводимой мощности. Условия их возникновения определяются при вычислении полюсов подынтегральной функции выражения (11). Эти полюса соответствуют решению уравнения

$$\cos\beta d - i\frac{\beta_0}{\beta}\sin\beta d = 0. \quad (12)$$

Нахождение действительных корней этого уравнения производится графически и сводится к следующему. Так как  $k > h > k_0$ , то  $\beta_0$  — чисто мнимая величина и ее можно обозначить как  $\beta_0 = ig$ .

Условием действительности корней уравнения (12) считается

$$(\beta d)^2 + (gd)^2 = \left(\frac{2\pi}{\lambda}d\sqrt{\epsilon-1}\right)^2 = R^2 = \text{const}, \quad (13)$$

и его решение строится в координатах  $\beta d$  и  $gd$ . Уравнение (12) преобразуется к виду

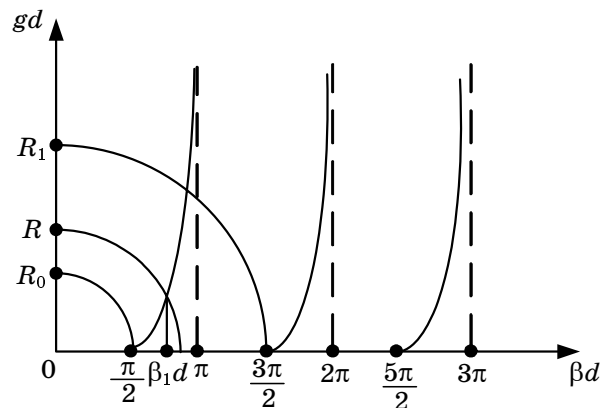
$$gd = -\beta d \text{ctg}\beta d. \quad (14)$$

Из построенных графиков для выражений (13) и (14) (рис. 3) видно, что граничными точками возникновения общих корней этих уравнений являются

$$gd = 0, \beta d = n\pi + \frac{\pi}{2}, n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (15)$$

При постепенном увеличении  $R^2$  значение корней изменяется; так, например, при  $R_1 > R > R_0$  значение корня равно  $\beta_1 d$ .

Распределение поля поверхностной волны характеризуется экспоненциальным уменьшением



■ Рис. 3. Графики для выражений (13) и (14)

его амплитуды при удалении от диэлектрического покрытия вдоль координаты  $x$ . Поверхностная волна распространяется вдоль диэлектрика (координата  $z$ ) с коэффициентом замедления  $\eta = \frac{c}{\vartheta}$ , локализуясь у границы раздела покрытия со свободным пространством. Название «поверхностная волна» выражает то, что поле подобных волн сосредоточено вблизи поверхности. Распространение поверхностных волн связано с явлением полного внутреннего отражения при падении плоской волны из диэлектрика 1 на плоскую границу раздела с воздухом 2 (см. рис. 2). Эта волна  $h_{\text{пов}}$  отражается от границы раздела диэлектрика со свободным пространством и проводящего экрана с диэлектриком. В соответствии с концепцией парциальных плоских волн они не проходят в воздух, а лишь индуцируют в нем поля, экспоненциально убывающие от поверхности из-за того, что угол падения на границу раздела больше угла полного внутреннего отражения. Поле локализуется у границы раздела при  $\eta > 1$  (медленные волны), при  $\eta < 1$  поле представляет собой плоскую волну, распространяющуюся под углом  $\theta$  ( $\cos\theta = \eta$ ) к границе раздела. Возбужденная поверхностная волна существенно влияет на характеристики излучения антенн с диэлектрическими покрытиями. Она может отражаться от различных неоднородностей в структуре покрытия, от деталей крепления покрытий и попадать на раскрыв антенны. При конечных размерах покрытия поверхностная волна, переизлучаясь вследствие дифракции на краях, изменяет диаграмму направленности антенны. Количество типов волн, возбуждаемых на покрытии, можно определить из выражений  $d < n\lambda/2\sqrt{\epsilon-1}$  для волн типа  $E$  и  $d < (2n+1)\lambda/4\sqrt{\epsilon-1}$  для волн типа  $H$ , где  $n$  — индекс при типе волны.

Решение интеграла (11) методом перевала позволяет записать выражение для расчета диаграммы направленности антенны с покрытием в предположении, что распределение электромагнитного поля в раскрыве рупора постоянно, т. е.  $E_y(0, z) = E_0 = \text{const}$ :

Решение интеграла (11) методом перевала позволяет записать выражение для расчета диаграммы направленности антенны с покрытием в предположении, что распределение электромагнитного поля в раскрыве рупора постоянно, т. е.  $E_y(0, z) = E_0 = \text{const}$ :

Решение интеграла (11) методом перевала позволяет записать выражение для расчета диаграммы направленности антенны с покрытием в предположении, что распределение электромагнитного поля в раскрыве рупора постоянно, т. е.  $E_y(0, z) = E_0 = \text{const}$ :

$$E_y(r, \theta) = \frac{1}{\sqrt{r}} e^{ik_0(r-d)} e^{-i\frac{\pi}{4}} \sqrt{k_0 D \cos\theta} \frac{\sin\left(\frac{k_0 D}{2} \sin\theta\right)}{\frac{k_0 D}{2} \sin\theta} \cos\left(k_0 d \sqrt{\epsilon - \sin^2\theta}\right) - i \frac{\cos\theta}{\sqrt{\epsilon - \sin^2\theta}} \sin\left(k_0 d \sqrt{\epsilon - \sin^2\theta}\right) \quad (16)$$

Квадрат модуля рассчитываемой напряженности электрического поля будет

$$|E_y(r, \theta)|^2 = \frac{k_0}{r} \frac{\cos^2\theta D^2 \left[ \frac{\sin\left(\frac{k_0 D}{2} \sin\theta\right)}{\frac{k_0 D}{2} \sin\theta} \right]^2}{1 + \frac{1-\epsilon}{\epsilon - \sin^2\theta} \sin^2\left(k_0 d \sqrt{\epsilon - \sin^2\theta}\right)} \quad (17)$$

Расчитанные нормированные диаграммы направленности излучающей антенны ( $\lambda = 8$  мм) с однородным диэлектрическим покрытием показаны на рис. 4.

Для антенны 4 постоянные распространения поверхностных волн  $h_{\text{пов}4} = 1,52k_0$ , для антенн 1, 2, 3 соответственно  $h_{\text{пов}1} = 1,95k_0$ ,  $h_{\text{пов}2} = 1,75k_0$ ,  $h_{\text{пов}3} = 1,58k_0$ . Очевидно, что с увеличением толщины диэлектрического слоя число поверхностных волн растет. Постоянные распространения определены из решения дисперсионного уравнения (14).

Из сравнения кривых 3 и 4 (см. рис. 4) следует, что наличие тонкой диэлектрической пластины перед излучающим раскрывом приводит к несущественному сужению диаграммы направленности. Кривые 1 и 2 показывают, что наличие достаточно толстого диэлектрического слоя перед излучающим раскрывом вызывает значительные осцилляции в диаграмме направленности. При дальнейшем увеличении электрической толщины диэлектрического слоя частота осцилляции будет увеличиваться с одновременным ростом глубины провала в диаграмме направленности излучающей апертуры. Полученные теоретические результаты подтверждаются экспериментально на установке.

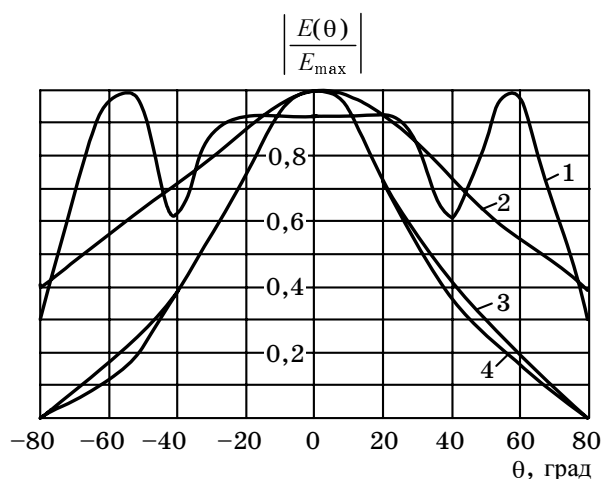


Рис. 4. Диаграммы направленности излучающей антенны с однородным диэлектрическим покрытием: 1 — раскрыв  $D = 2$  мм с покрытием  $\epsilon = 4$  толщиной  $d = 10$  мм; 2 — раскрыв  $D = 2$  мм без покрытия; 3 — раскрыв  $D = 8$  мм без покрытия; 4 — раскрыв  $D = 8$  мм с покрытием  $\epsilon = 4$  толщиной  $d = 10$  мм

Произведенная оценка влияния однородного диэлектрического покрытия на излучение из апертуры в проводящем экране показывает, что за счет излучения в сложную среду происходит рассогласование антенны, уменьшение КПД, а также значительное изменение формы диаграммы направленности.

### Материалы, применяемые для СВЧ-диэлектрических покрытий антенн

В зависимости от условий эксплуатации антенн применяются различные сверхвысокочастотные диэлектрические покрытия. Как известно, электрическими параметрами СВЧ-диэлектриков являются диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$  и тангенс диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta$ . Широкое распространение в настоящее время получили стеклопластики, которые по своим физико-механическим свойствам превосходят другие пластмассы, такие как метакрилат, полистирол, политен, и составляют первую группу покрытий [4]. Наполнителем этого материала является неорганическое вещество, а связующее имеет органическое происхождение. Стеклопластик имеет пористую структуру и характеризуется неоднородными свойствами. При работе его в условиях морской воды, дождей со временем происходит заполнение пор влагой, что ведет к изменениям  $\epsilon$  и  $\text{tg}\delta$  материала. Влагостойкость стеклопластика определяется главным образом свойствами связующего. Стеклопластики обладают сравнительно хорошими  $\epsilon$  и  $\text{tg}\delta$  в сантиметровом диапазоне длин волн. В качестве связующих в них используются фенолформальдегидная, эпоксинокремнийорганическая и эпоксинофенольная смолы, сополимеры дивинила со стиролом и т. д. Наполнителями здесь являются различные типы стеклотканей. Диэлектрическая проницаемость таких стеклопластиков лежит в пределах 3–8. С увеличением объемного содержания стекла проницаемость  $\epsilon$  покрытия растет, а  $\text{tg}\delta$  незначительно падает. Была установлена зависимость изменения водопоглощения стеклопластиков на основе эпоксинокремнийорганической смолы и дивинила со стиролом от времени пребывания их в воде  $T$  при различных значениях объемного содержания стекла  $V_c$ . С ростом  $T$  водопоглощение растет, пока не достигнет определенного уровня насыщения [4].

Использование стеклопластиков при высоких температурах ограничено из-за нестабильности их электрических характеристик:  $\epsilon$  и  $\text{tg}\delta$  изменяются в значительных пределах. С возрастанием температуры и относительной влажности атмосферы проникновение водяных паров и влаги внутрь диэлектрического покрытия растет. Основной способ борьбы с проникновением влаги — нанесение специальных покрытий (например, эпоксиноаминной грунтовки и фторопластовой эмали) в несколько слоев. Толщина защитных покрытий при этом меняется от 0,14–0,15 мм (5 слоев) до 0,25–

0,26 мм (11 слоев). Количество слоев грунтовки и эмали определяется состоянием поверхности (пористость, раковины, недопропитка, механические повреждения и т. д.). Изменение  $\epsilon$  и  $\text{tg}\delta$  материала с влагозащитными покрытиями незначительно, а водопоглощение может снижаться в 20 раз.

При воздействии атмосферных осадков на диэлектрическом покрытии антенн могут конденсироваться различные гидрообразования с иными электрическими свойствами. В результате происходит искажение пространственно-поляризационной структуры проходящей электромагнитной волны, уменьшается соотношение сигнал/шум. Существуют гидрофобные кремнийорганические полимеры в виде жидкостей, смол, лаков, адгезия льда с которыми в 2 раза меньше, чем у обычных покрытий. Эффективность использования покрытий из таких полимеров зависит от состояния защищаемой поверхности и гидрометеорологических условий и снижается из-за высокой чувствительности их к солнечной радиации и слабого сцепления с покрываемой поверхностью. Срок их эксплуатации колеблется от 1 до 5 мес.

В качестве диэлектрических покрытий антенн стеклопластики используются на подводных, надводных судах и летательных аппаратах, при полете которых температура поверхности не превышает 500 °С. До температур 500–1000 °С применяют также керамопласты — смесь синтетической слюды со стеклянным или кристаллическим связующим.

Вторую группу покрытий составляют неорганические материалы. По структуре они могут быть аморфными (кварцевое стекло), кристаллическими (алюмооксидная керамика) и кристаллическими с аморфной фазой (ситалл). По химическому составу большинство применяемых материалов — неорганические окислы (оксиды), такие как двуокись кремния  $\text{SiO}_2$  (кварцевое стекло, ситаллы, пирокерамы), окись алюминия  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (сапфирит), окись бериллия (брокерит). Применяются также материалы на основе соединений азота (нитриды), серы (сульфиды) и т. д. Эти материалы, как правило, имеют температуру плавления более 1500 °С и успешно применяются для защиты антенн в основном на летательных аппаратах при гиперзвуковых скоростях полета. Начальные значения диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь лежат в значительных пределах и зависят от свойств керамики. С увеличением процентного содержания пор в материалах их  $\epsilon$  падает. Материалы на основе плавленого кварца выдерживают длительное воздействие температуры до 2500 °С, имеют низкие значения  $\epsilon$  и  $\text{tg}\delta$ . Для уменьшения водопоглощения производят плазменную обработку их поверхностей [4].

Исходя из требований, предъявляемых к механической прочности, гидро- и аэродинамическим характеристикам аппаратов, используют как од-

■ Электрические параметры диэлектрика при  $t = 20\text{ }^\circ\text{C}$

Диэлектрик	$f = 100\text{ Гц}$		$f = 1\text{ МГц}$		$f = 10\text{ ГГц}$	
	$\epsilon$	$\text{tg}\delta$	$\epsilon$	$\text{tg}\delta$	$\epsilon$	$\text{tg}\delta$
Бумага	3,70	0,0090	–	–	–	–
Кварц	3,85	0,0010	3,82	0,0002	3,80	0,0002
Неопрен	6,90	0,0100	–	–	–	–
Плексиглас	3,40	0,0600	2,70	0,0150	2,50	0,0050
Полихлорвинил	3,18	0,0130	2,88	0,0160	2,84	0,0055
Полистирол	2,55	0,0004	2,54	0,0002	2,54	0,0005
Полиэтилен	2,30	0,0002	2,30	0,0002	2,30	0,0004
Слюда	5,43	0,0050	5,40	0,0004	5,40	0,0003
Стеатит	6,30	0,0015	6,20	0,0004	5,40	0,0002
Стекло пирекс	5,60	0,0100	–	–	–	–
Текстолит ВЧ	6,50	0,1350	4,75	0,0410	3,25	0,0460
Гетинакс ВЧ	5,23	0,0230	4,60	0,0340	3,55	0,0700
Шелк натуральный	4,50	–	–	0,0150	–	–
Полиамиды	3,60	0,0650	3,20	0,0380	2,85	0,0125
Полиэфир	3,50	0,0030	3,40	0,0060	–	–
Эоксиды	3,90	0,0013	3,70	0,0190	3,08	0,0230
Бакелит	5,00	0,1000	4,90	0,0300	4,70	0,0500
Стеклопластики на основе:						
ВФТ-С, АСТГ6-С2	–	–	–	–	4,25–4,50	0,0100–0,0200
ФН, АСТГ6-С2	–	–	–	–	3,80–3,95	0,0160–0,200
ЭФ32-301, АСТГ6-С2	–	–	–	–	4,50–4,70	0,0140–0,0170
ТФЭ-9, ТС8/3-250Г	–	–	–	–	4,00–5,00	–
«Диенола-с», АСТГ6-С2	–	–	–	–	3,50–4,00	–
Нитрит бора	4,15	0,0010	4,15	0,0002	4,15	0,0003
Супрамика 550	–	–	–	–	6,90	0,0025
Нитрид кремния	–	–	9,40	0,0010–0,0100	–	–

нослойные, так и многослойные диэлектрические покрытия антенн. Например, для подводных судов, корпуса которых должны выдерживать большие давления, применяют многослойные покрытия. Для фазированных антенных решеток на надводных судах используют часто однослойные однородные покрытия. На гиперзвуковых летательных аппаратах теплозащитное покрытие представляет собой многослойную неоднородную систему. Нагревостойкие диэлектрические вставки являются, как правило, однослойными с начальным однородным распределением  $\epsilon$  и  $\text{tg}\delta$  по толщине [3].

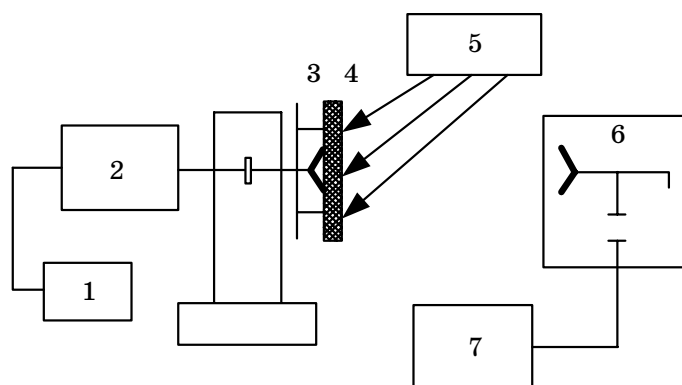
В таблице представлены значения электрических параметров некоторых материалов, используемых в диэлектрических покрытиях [4]. Вели-

чины  $\epsilon$  и  $\text{tg}\delta$  необходимо учитывать при оценке влияния материала покрытия на характеристики излучения антенн.

**Установка для экспериментальных исследований влияния различных диэлектрических покрытий на диаграммы направленности антенн**

Экспериментальные исследования предполагают снятие диаграмм направленности антенн с различными типами покрытий при разных внешних воздействиях и сравнение их с диаграммой направленности без покрытия и между собой и выпосты на измерительной установке (рис. 5). Все измерения производятся в безэховой камере.





■ **Рис. 5.** *Схема измерительной установки: 1 — источник питания; 2 — твердотельный генератор на диоде Ганна; 3 — излучающий H-плоскостной рупор; 4 — приспособление для установки в раскрытие антенны диэлектрических материалов; 5 — имитаторы внешних воздействий (орбитальный холод, радиационный солнечный нагрев, плазматрон и др.); 6 — приемный рупор с волноводной детекторной секцией на выходе; 7 — измерительный усилитель и комплект материалов разной толщины и диэлектрической проницаемости*

Таким образом, исследования влияния диэлектрического покрытия на характеристики излучения апертурной антенны показали, что за счет излучения в сложную среду происходит рассогласование антенны, возбуждение поверхностных волн на диэлектри-

ке и высших типов волн в апертуре, а также значительное изменение формы диаграммы направленности. Дополнительные потери в материале покрытия приводят к уменьшению КПД антенны и должны быть учтены в процессе проектирования антенн.

### Литература

1. Каплун В. А. Обтекатели СВЧ. М.: Сов. радио, 1974. 239 с.
2. Пригода В. А., Кокунько В. С. Обтекатели антенн летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1970. 288 с.

3. Красюк В. Н., Михайлов В. Ф. Бортовые антенны гиперзвуковых летательных аппаратов. СПб.: ГААП, 1996. 246 с.
4. Красюк В. Н. Антенны СВЧ с диэлектрическими покрытиями. Л.: Судостроение, 1986. 164 с.
5. Кюн Р. Микроволновые антенны. Л.: Судостроение, 1976. 660 с.

УДК 615.471:617.7

## О ТОЧНОСТИ СПЕКТРАЛЬНЫХ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ВАРИАбельНОСТИ СЕРДЕЧНОГО РИТМА

**А. Н. Калиниченко,**

научный сотрудник, доцент

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

Представлены результаты экспериментального исследования ошибки определения оценок частотных показателей вариабельности сердечного ритма при использовании наиболее распространенных методов спектрального анализа: на основе быстрого преобразования Фурье и на основе модели авторегрессии. Показано, что как точность, так и статистическая устойчивость общепринятых спектральных показателей вариабельности, рассчитанных по отдельной реализации сигнала, относительно невелики, что необходимо учитывать при практическом использовании данной методики.

*The results of experimental estimation of the heart rate variability spectral parameters accuracy and validity are presented. Two groups of the spectral analysis methods were considered: FFT based and parametric (based on autoregressive model). It is shown that all the common methods provide comparatively high level of the spectral parameters estimation errors.*

### Введение

Методика анализа вариабельности сердечного ритма (ВСР) предполагает исследование статистических и частотных свойств сигнала, образуемого последовательностью интервалов времени между смежными сокращениями сердца, относящимися к фоновому ритму. Установлено [1, 2], что анализ ВСР позволяет получить количественные индикаторы активности различных отделов вегетативной нервной системы человека, что оказывается полезным для решения многих медицинских диагностических задач. Интервалы времени между последовательными сокращениями сердца (RR-интервалы) измеряются по ЭКГ (обычно — как расстояния между вершинами R-зубцов QRS-комплексов). Если за период регистрации ЭКГ в сигнале наблюдались нарушения сердечного ритма или помехи, вызвавшие ошибки в определении RR-интервалов, то участки сигнала, соответствующие этим событиям, должны исключаться из процедуры анализа. В связи с этим при анализе ВСР в качестве входных данных принято использовать не непосредственно последовательность RR-интервалов, а так называемую последовательность NN-интервалов (т. е. интервалов между смежными QRS-комплексами фонового ритма или комплексами класса «норма») [1, 2]. Так как анализируемая последовательность интервалов времени не

является равномерно дискретизованным сигналом, традиционно используемым при частотном анализе, то к ней нельзя непосредственно применить общепринятые методы цифровой обработки. Поэтому на первом этапе анализа из последовательности NN-интервалов с использованием гладкой интерполяции получают равномерно дискретизованный сигнал (частота дискретизации обычно составляет 4 Гц), который рассматривается как описание восстановленной функции управления сердечным ритмом [1, 2]. Именно исследование этой функции, порождающей последовательность регистрируемых RR-интервалов, является предметом анализа ВСР. Международными стандартами по анализу ВСР [1] в качестве основных спектральных показателей рекомендованы три параметра, представляющих собой суммарные мощности в трех диапазонах частот: VLF (0,003–0,04 Гц), LF (0,04–0,15 Гц) и HF (0,15–0,4 Гц), а также ряд показателей, производных от перечисленных параметров.

Спектральные показатели ВСР рассчитываются с использованием как непараметрических (классических) методов, основанных на дискретном преобразовании Фурье (или на алгоритме ускоренного вычисления этого преобразования — быстрое преобразование Фурье (БПФ)), так и параметрических методов, в основе которых лежит модель авторегрессии — скользящего среднего [1]. При-

менение указанных методов связано с рядом ограничений и допущений, каждое из которых оказывает влияние на точность и статистическую устойчивость получаемых оценок [3].

В частности, использование методов на основе БПФ подразумевает следующие условия.

- Входной сигнал рассматривается как бесконечный и периодический с периодом повторения, равным длительности анализируемого фрагмента. Это отражается в дискретности получаемого спектра и его ограниченном разрешении по частоте, которое тем хуже, чем короче взятый для анализа фрагмент.

- Взятие фрагмента сигнала конечной длительности в неявном виде предполагает использование прямоугольного окна, что ведет к появлению эффекта спектральной утечки, т. е. растекания энергии периодических компонент сигнала по частотному диапазону.

- Представление анализируемого сигнала в дискретной форме приводит к тому, что получаемый спектр является бесконечным и периодическим.

- Достоверная оценка какой-либо частотной составляющей может быть получена лишь при условии, что анализируемый фрагмент сигнала включает, по меньшей мере, 4–5 периодов колебаний с соответствующей частотой.

Для параметрических методов, в свою очередь, характерны следующие особенности.

- Рассчитанный частотный спектр не является обратимым, т. е. по нему не может быть точно восстановлен исходный сигнал.

- Получаемая спектральная оценка существенно зависит от выбора порядка модели. Кроме того, необходимость подбора оптимального порядка включает возможность полностью автоматического расчета спектральных оценок.

- Для моделирования низкочастотных компонент анализируемого сигнала требуется использовать достаточно большие значения порядка модели, что приводит к высокой вычислительной сложности процедур анализа.

Помимо этого для обеих групп методов характерны следующие проблемы.

- Использование методов спектрального анализа предполагает выполнение условия стационарности исследуемого процесса, что для сигнала сердечного ритма может считаться справедливым лишь условно и на ограниченных отрезках времени.

- Получаемые спектральные оценки носят случайный характер, что связано со случайностью анализируемого процесса [3].

Из перечисленных условий видно, что спектральные параметры, получаемые по фрагментам сигнала относительно небольшой длительности (один из наиболее распространенных подходов при анализе ВСП), могут служить лишь приближенными оценками истинных частотных свойств изучаемого сигнала. С другой стороны, метод получения показателей VLF, LF и HF как суммарных мощностей в определенных частотных диапазонах

соответствует использованию усреднения по частоте, которое само по себе должно повышать статистическую устойчивость результатов [3]. Целью данной работы являлось исследование наиболее часто используемых методик расчета спектральных показателей ВСП с точки зрения оценки точности и статистической устойчивости получаемых частотных параметров.

### Методы исследования

Представленные в настоящей работе исследования проводились путем моделирования сигнала сердечного ритма и алгоритмов его анализа в программной среде MATLAB.

В целях исследования точности вычисления спектральных оценок была создана модель сигнала, обладающего частотными свойствами, характерными для сигнала ВСП в норме (концентрация мощности в диапазонах частот VLF, LF и HF) [1, 4]. Для этого в трех указанных диапазонах частот были сформированы три огибающие функции спектральной плотности мощности (СПМ) в форме гауссовых кривых, центр каждой из которых расположен в середине соответствующего диапазона частот, а значения на границах диапазона составляют приблизительно 1% от максимума для данной кривой. Масштаб каждой из трех кривых был выбран таким, чтобы величина площади под ней равнялась 500, что соответствует порядку наблюдаемых в норме значений показателей ВСП VLF, LF и HF, измеренных в миллисекундах в квадрате.

Выражение для отсчетов полученной функции имеет вид

$$p_j = \frac{500}{\sqrt{2\pi}} \sum_{j=0}^{N-1} \sum_{i=1}^3 \frac{1}{\sigma_i} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{j\Delta f - f_{i0}}{\sigma_i} \right)^2} \left[ \text{мс}^2 / \text{Гц} \right], \quad (1)$$

где  $N = 512$  — выбранное число отсчетов по частоте в диапазоне частот от 0 до  $f_{\max} = 0,5$  Гц;  $\Delta f = f_{\max} / N = 0,5 / 512$  — шаг по частоте;  $i = 1, 2, 3$  — номер диапазона частот (соответственно для диапазонов VLF, LF и HF);  $\sigma_i = (f_{i2} - f_{i1}) / 6$  — среднеквадратическое отклонение (СКО) для соответствующей гауссовой кривой (здесь  $f_{i1}$  и  $f_{i2}$  — границы  $i$ -го диапазона).

По отсчетам модельной СПМ были восстановлены значения модулей амплитудного спектра

$$A_j = \sqrt{2\Delta f p_j} \left[ \text{мс} \right]. \quad (2)$$

Рассчитанные значения компонент амплитудного спектра были использованы для создания модельного сигнала функции управления сердечным ритмом:

$$s_i = \sum_{k=0}^K \sum_{j=0}^{N-1} A_j \sin \left[ 2\pi (jT\Delta f + \phi_j) \right] + C \left[ \text{мс} \right],$$

где  $K = 102\,400$  — выбранное число отсчетов сигнала;  $T = 10$  мс — интервал дискретизации (соот-

ветствует частоте дискретизации 100 Гц);  $C = 1000$  мс — произвольно выбранное среднее значение RR-интервала, а  $\phi_j = \text{rand}(j)$  — фазовый сдвиг для  $j$ -й синусоиды, полученный как случайное число с равномерным распределением в диапазоне от 0 до 1 (случайный фазовый сдвиг использован для предотвращения эффектов интерференции синусоид с частотами, кратными  $\Delta f$ ). В результате была получена реализация модельного сигнала, имеющая длительность 1024 с (или 17 мин и 4 с), с частотой дискретизации 100 Гц.

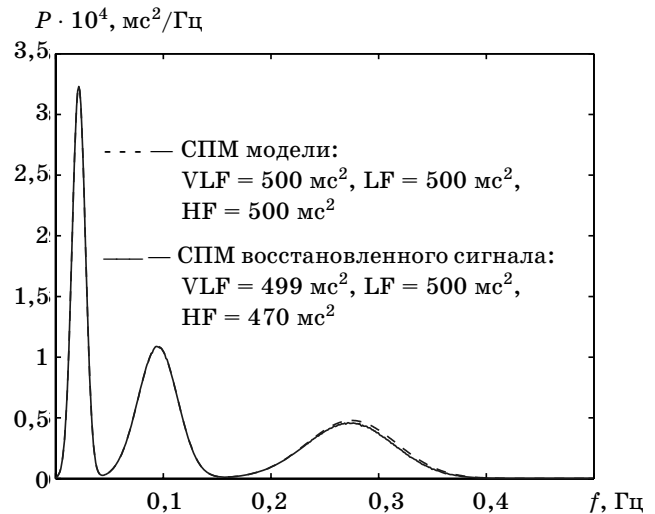
Последовательность RR-интервалов, соответствующая рассчитанному по формуле (3) сигналу, была сгенерирована с использованием концепции модели порождения сигнала сердечного ритма, известной как IPFM (Integral Pulse Frequency Modulation — интегральная импульсно-частотная модуляция) [5], в соответствии с описанным ниже алгоритмом.

1.  $n := 1$  (начальное значение номера RR-интервала).
2.  $k := 1$  (начальное значение номера отсчета сигнала).
3.  $r := 0$  (начальное значение первого RR-интервала).
4.  $r := r + T$  (накопление значения очередного интервала).
5. Если  $r < s_k$ , то переход к п. 8.
6.  $R_n := s_{k-1}$  (запись значения  $n$ -го RR-интервала).
7.  $r := s_k - r$  (начальное значение следующего RR-интервала).
8.  $k := k + 1$  (переход к очередному отсчету сигнала).
9. Если  $k \leq K$ , то переход к п. 4, в противном случае — завершение процедуры.

Полученная последовательность RR-интервалов содержит 1024 значения. Далее с использованием интерполяции кубическими сплайнами была восстановлена исходная функция управления в виде равномерно дискретизованного сигнала с частотой  $f_d = 4$  Гц (частота, рекомендуемая международным стандартом по ВСП [1]). Число отсчетов полученной реализации составило  $4096 = 2^{12}$ , что позволяет непосредственно использовать алгоритм БПФ для расчета СПМ сигнала по всей реализации целиком.

На рис. 1 показаны графики СПМ модельного сигнала и сигнала, восстановленного по последовательности RR-интервалов, а также приведены значения спектральных показателей ВСП, рассчитанные для обеих кривых СПМ. Как можно видеть, СПМ, рассчитанная по всей реализации модельного сигнала, почти совпадает с исходной СПМ модели, а значения параметров близки к заданным для модели. Некоторая потеря мощности для показателя HF (около 6%) объясняется сглаживающим эффектом интерполяции с использованием кубических сплайнов.

На рис. 2, а показан фрагмент сгенерированной последовательности RR-интервалов, а на



■ Рис. 1. Графики СПМ модельного сигнала и сигнала, восстановленного по модельной последовательности RR-интервалов

рис. 2, б — график равномерно дискретизованной функции, восстановленной по данному фрагменту.

Достаточно точное совпадение как СПМ, так и спектральных параметров с теоретически заданными значениями объясняется в данном случае тем, что при таком способе получения модельного сигнала все синусоиды, составляющие сигнал согласно формуле (3), целое число раз укладывались в генерируемый фрагмент, что исключает появление эффекта спектральной утечки. Таким образом, было показано, что модельный сигнал обладает заданными для модели частотными свойствами и может рассматриваться в качестве образца реализации сигнала сердечного ритма, стационарной на всем протяжении.

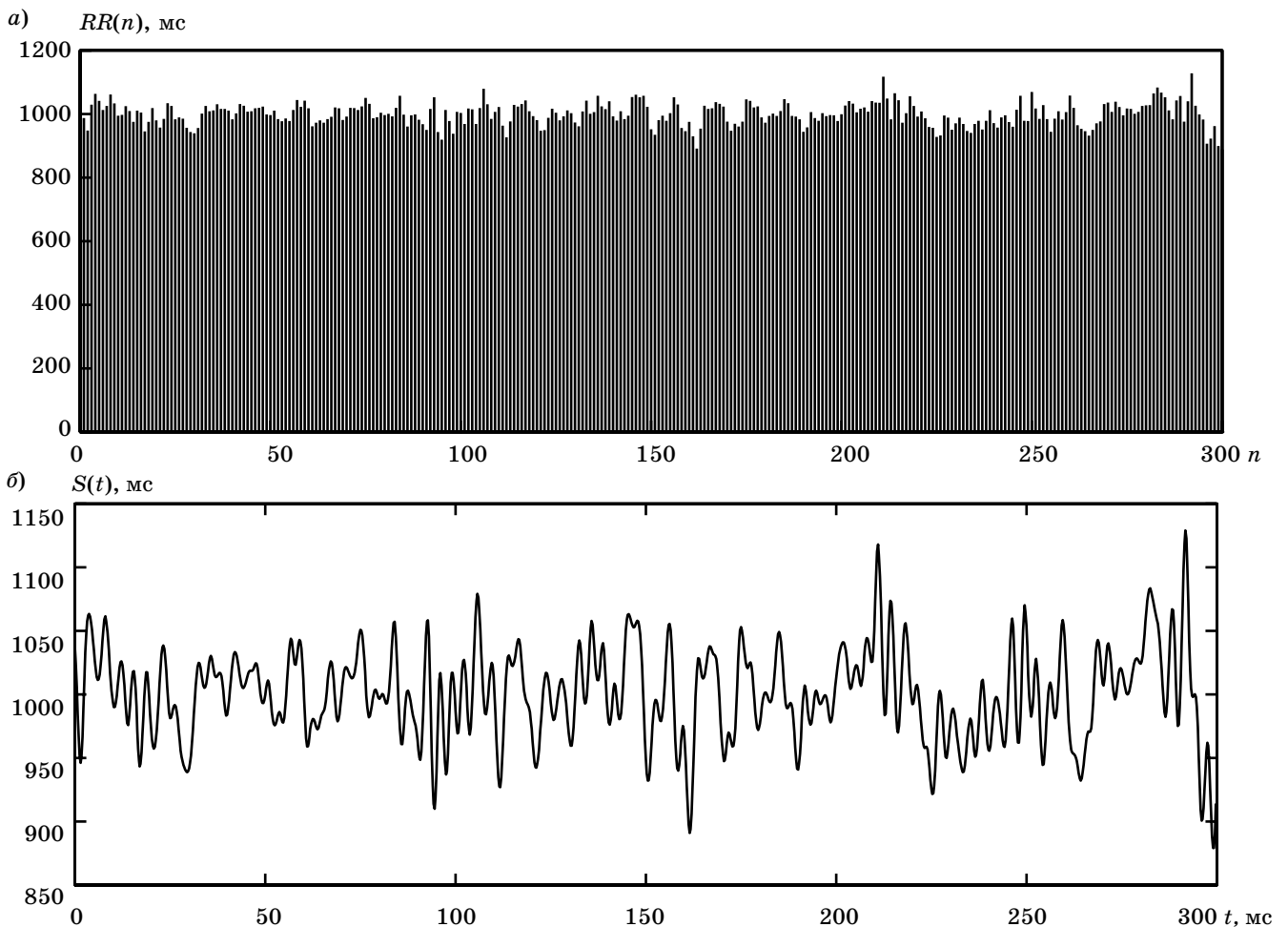
При практическом использовании методик оценки частотных параметров ВСП принято выполнять анализ либо по коротким фрагментам сигнала (обычно — 5 мин), получаемым в ходе процедур функциональных исследований, либо по суточным записям, получаемым в ходе холтеровского мониторингового наблюдения [1, 2]. В данном исследовании рассматривался только первый подход.

Исследовались методы, наиболее часто применяемые при спектральном анализе, рекомендованные международным и российским стандартами по анализу ВСП [1–3].

1. Непараметрические (классические) методы на основе дискретного преобразования Фурье:

— периодограммный метод с использованием четырех типов окон — прямоугольного, Бартлетта (треугольного), фон Ханна и Тьюки (10%–80%–10%);

— метод Уэлча с разбиением пятиминутного фрагмента на три перекрывающихся сегмента длительностью по 3 мин с использованием окна фон Ханна [2].



■ Рис. 2. Фрагмент ритмограммы для модельной последовательности  $RR$ -интервалов (а) и график равномерно дискретизованной функции, восстановленной по данному фрагменту (б)

2. Параметрические методы на основе авторегрессионной модели со значениями порядка 20, 30 и 50:

- метод Берга;
- ковариационный метод;
- модифицированный ковариационный метод.

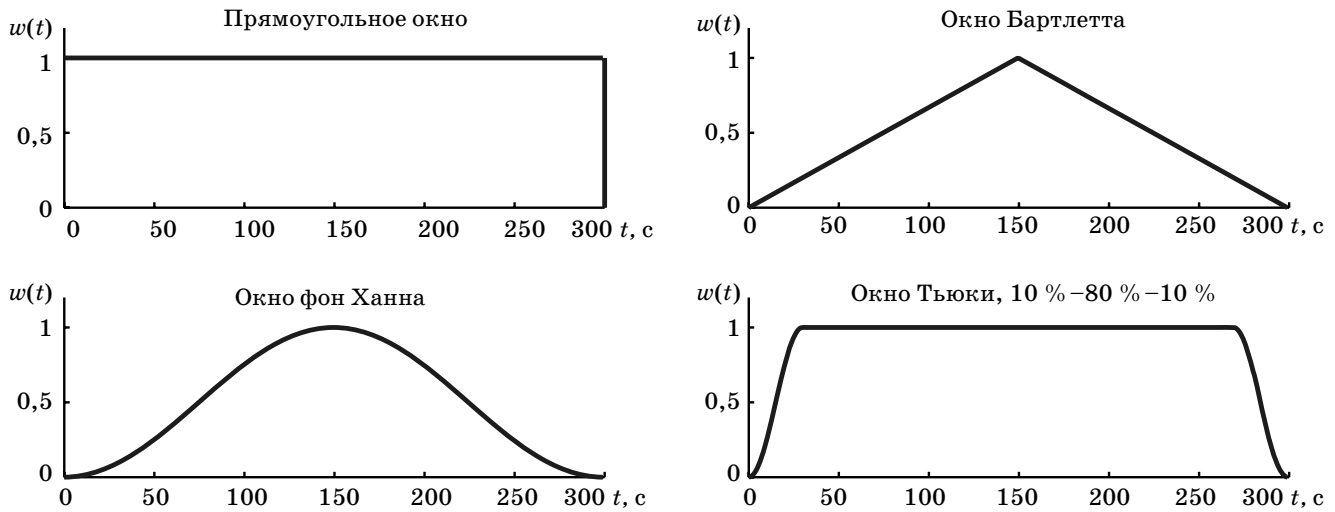
Графики использованных оконных функций приведены на рис. 3. Выбор окон определялся следующими соображениями. Использование прямоугольного окна соответствует операции взятия конечного фрагмента без какого-либо сглаживания сигнала по краям, что ведет к существенной спектральной утечке, но обеспечивает наилучшее возможное разрешение по частоте. Окно Бартлетта (треугольное) является часто используемым простейшим сглаживающим окном. Окно фон Ханна обеспечивает высокую степень снижения спектральной утечки (правда, за счет заметного ухудшения разрешения спектра) [2]. Окно Тьюки с 10%-ми косинусными склонами представляет собой часто используемое эмпирическое окно, обеспечивающее достижение практического компромисса между спектральной утечкой и потерей спектрального разрешения.

Для получения оценок статистической устойчивости результатов из модельной последовательности  $RR$ -интервалов случайным образом выбирались 20 фрагментов продолжительностью по 5 мин каждый. Эти фрагменты были использованы для вычисления СПМ и спектральных параметров с помощью каждого из перечисленных методов. К каждому из анализируемых фрагментов применяли следующие процедуры предварительной обработки:

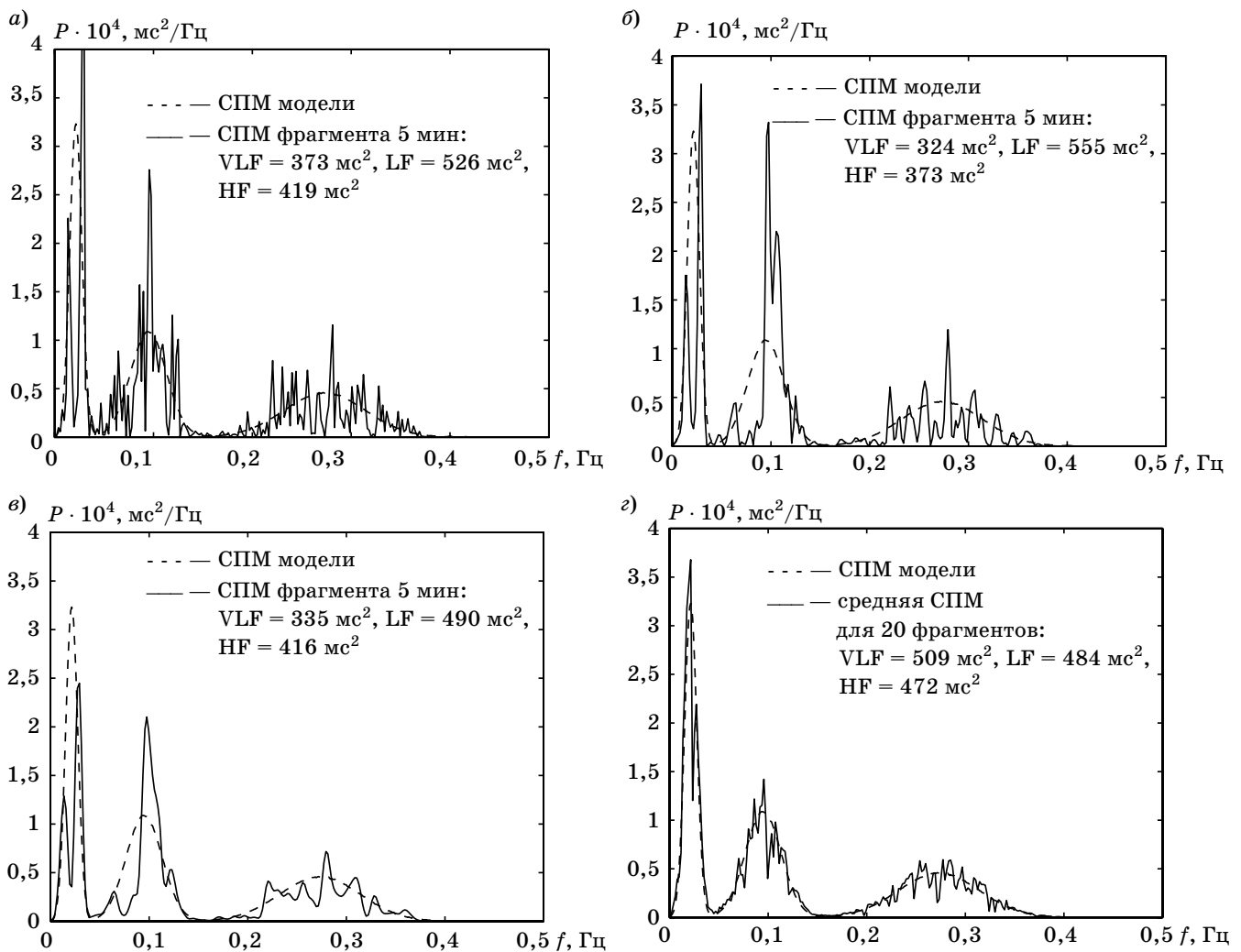
- восстановление функции управления сердечным ритмом методом гладкой интерполяции с использованием кубических сплайнов;
- получение равномерно дискретизованного сигнала (1200 отсчетов с частотой  $f_d = 4$  Гц);
- удаление линейного тренда с использованием метода наименьших квадратов.

Дальнейшие процедуры для методов на основе БПФ включали следующие этапы (с учетом различий между периодограммным методом и методом Уэлча):

- умножение фрагмента на оконную функцию;
- дополнение нулями до  $N = 2048$  отсчетов;
- расчет дискретного преобразования Фурье с помощью алгоритма БПФ;



■ Рис. 3. Окна, использованные при исследовании непараметрических методов



■ Рис. 4. Графики оценок СПМ, полученных для одного и того же фрагмента модельного сигнала непараметрическими методами: а и б — периодограммный метод с прямоугольным окном и окном фон Ханна; в — метод Уэлча с окном фон Ханна; г — усредненная оценка СПМ для периодограммного метода с использованием прямоугольного окна

— расчет СПМ в диапазоне частот от 0 до 0,5 Гц:

$$p(f_k) = \frac{1}{N f_{\Delta}} \sum_{f_k=0}^{0,5} \{ \text{Re}^2 [X(f_k)] + \text{Im}^2 [X(f_k)] \},$$

где  $f_{\Delta} = 4$  Гц,  $f_k = k \Delta f$  ( $\Delta f = f_{\Delta} / N$ ),  $k = 0, 1, 2, \dots, N/2$ ;  $X(f_k)$  и  $p(f_k)$  — соответственно значения компонент разложения по Фурье и СПМ для частот  $f_k$ ;

— домножение СПМ на корректирующий коэффициент, учитывающий потери мощности при использовании окна:

$$k_w = \frac{1}{\frac{1}{N_w} \sum_{n=1}^{N_w} w^2(n)},$$

где  $N_w$  — размер окна в отсчетах;  $w(n)$  — отсчеты оконной функции;

— домножение СПМ на корректирующий коэффициент, учитывающий потери мощности при дополнении нулями:

$$k_0 = N / N_0,$$

где  $N_0$  — число отсчетов фрагмента сигнала до дополнения нулями.

Для параметрических методов СПМ рассчитывалась непосредственно с помощью процедур MATLAB, реализующих соответствующие методы.

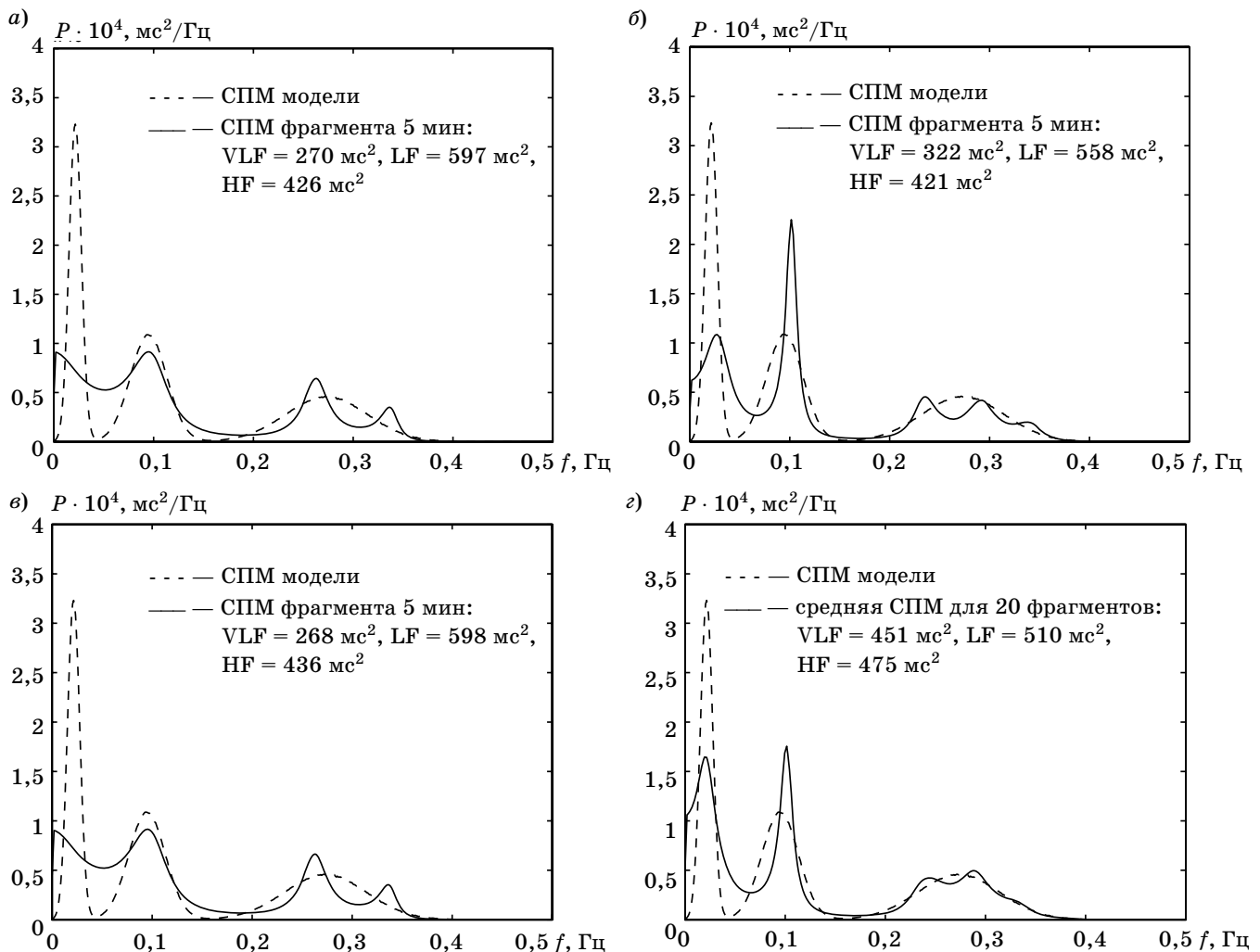
Показатели VLF, LF и HF вычислялись интегрированием СПМ по соответствующим диапазонам частот с использованием формулы прямоугольников [3]:

$$\text{VLF} = \Delta f \sum_k p(f_k), \quad 0,003 \leq f_k < 0,04 \text{ Гц};$$

$$\text{LF} = \Delta f \sum_k p(f_k), \quad 0,04 \leq f_k < 0,15 \text{ Гц};$$

$$\text{HF} = \Delta f \sum_k p(f_k), \quad 0,15 \leq f_k < 0,4 \text{ Гц}.$$

На рис. 4 и 5 приведены примеры графиков оценок СПМ, полученных для одного и того же фрагмента



■ Рис. 5. Графики оценок СПМ, полученных для одного и того же фрагмента модельного сигнала параметрическими методами: а и б — метод Берга со значениями порядка 20 и 50; в — модифицированный ковариационный метод с порядком, равным 20; г — усредненная оценка СПМ для метода Берга с порядком модели, равным 50

мента модельного сигнала с использованием трех различных вариантов непараметрических и параметрических методов соответственно. На графиках также указаны рассчитанные по этим СПМ значения параметров VLF, LF и HF. Для контроля на всех графиках пунктирной линией показана истинная СПМ модельного сигнала. Кроме того, для периодограммного метода с использованием прямоугольного окна и для метода Берга с порядком модели, равным 50, были рассчитаны оценки СПМ, усредненные по 20 случайно выбранным фрагментам модельного сигнала (см. рис. 4, з, 5, з).

Можно видеть, что оценки СПМ, полученные таким способом, оказываются существенно ближе к истинной СПМ модели. Однако этот результат получен благодаря стационарности процесса на всем протяжении модельного сигнала, что в реальных условиях анализа ВСП практически недостижимо.

### Результаты

Анализ приведенных на рис. 4 и 5 оценок СПМ, рассчитанных для отдельного фрагмента модельного сигнала, показывает, что как погрешность

■ Таблица 1

Параметр ВСП	Показатель точности	Периодограммный метод				Метод Уэлча с окном фон Ханна
		Окно				
		прямоугольное	Бартлетта	фон Ханна	Тьюки (10 % – 80 % – 10%)	
VLF	Среднее значение, мс <sup>2</sup>	509	551	555	526	537
	Максимальная ошибка, %	57	113	125	71	96
	СКО, %	31	47	49	34	41
LF	Среднее значение, мс <sup>2</sup>	484	469	468	482	468
	Максимальная ошибка, %	18	39	45	25	36
	СКО, %	9	25	27	12	21
HF	Среднее значение, мс <sup>2</sup>	472	470	471	470	469
	Максимальная ошибка, %	11	25	23	13	12
	СКО, %	6	12	13	6	8

■ Таблица 2

Параметр ВСП	Показатель точности	Метод Берга			Ковариационный метод			Модифицированный ковариационный метод		
		Порядок модели			Порядок модели			Порядок модели		
		20	30	50	20	30	50	20	30	50
VLF	Среднее значение, мс <sup>2</sup>	387	382	451	393	394	462	386	384	455
	Максимальная ошибка, %	-66	-64	-63	-66	-63	-62	-66	-63	-63
	СКО, %	32	30	35	32	29	36	32	30	36
LF	Среднее значение, мс <sup>2</sup>	553	539	510	554	538	510	554	539	510
	Максимальная ошибка, %	28	24	21	31	29	30	27	23	23
	СКО, %	9	9	9	10	11	12	9	9	10
HF	Среднее значение, мс <sup>2</sup>	478	476	475	473	474	474	478	475	474
	Максимальная ошибка, %	11	11	11	14	14	14	12	11	12
	СКО, %	6	5	5	6	5	6	5	5	6



расчета параметров VLF, LF и HF, так и разброс получаемых значений достаточно велики. В целях получения статистических оценок этих погрешностей для параметров, полученных для 20 случайно выбранных фрагментов, рассчитывались следующие показатели:

- среднее значение (характеризует наличие смещения величин оценок);
- максимальная относительная ошибка (показывает наихудший случай);
- СКО (характеризует разброс значений).

В табл. 1 и 2 сведены результаты полученных оценок точности и статистической устойчивости соответственно для непараметрических и параметрических методов.

### Выводы

На основании имеющихся результатов могут быть сделаны следующие выводы.

1. Все исследованные методы дают достаточно большую ошибку, особенно для значения показателя VLF, соответствующего наиболее низкочастотным компонентам сигнала сердечного ритма.

2. Из непараметрических методов наименьшую ошибку обеспечивает применение простейшего периодограммного метода с использованием прямоугольного окна.

3. Параметрические методы позволяют достоверно оценить компоненту VLF только при относительно высоких значениях порядка модели (не менее 30).

4. Относительно большие величины разброса значений и максимальной ошибки, полученные для большинства методов, означают, что спектральные показатели ВСП, рассчитанные по отдельно взятой пятиминутной реализации сигнала, обладают невысокой статистической устойчивостью.

Основным практическим выводом из приведенных результатов исследований может служить рекомендация рассматривать рассчитанные значения спектральных показателей ВСП лишь как приближенные оценки, дающие ориентировочное представление об интенсивности периодических процессов в соответствующих частотных диапазонах сердечного ритма.

### Литература

1. Heart rate variability. Standards of Measurement, Physiological interpretation and clinical use // *Circulation*. 1996. Vol. 93. P. 1043–1065.
2. Анализ вариабельности сердечного ритма при использовании различных электрокардиографических систем: Методические рекомендации // *Вестник аритмологии*. 2001. № 24. С. 65–87.
3. С. Л. Марпл-мл. Цифровой спектральный анализ и его приложения. М.: Мир, 1990.
4. McSharry P. E., Clifford G., Tarassenko L., Smith L. A. A dynamical model for generating synthetic electrocardiogram signals // *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. 2003. Vol. 50. N 3. P. 289–294.
5. Hyndman B. W., Mohn R. K. A Pulse Modulator Model of Pacemaker Activity: Digest of the 10<sup>th</sup> Int. Conf. on Med. & Biol. Eng. Dresden, 1973. P. 223.

УДК 519.862.6

## ЛОГИКО-ВЕРОЯТНОСТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РИСКА ПОРТФЕЛЯ ЦЕННЫХ БУМАГ

**В. В. Алексеев,**

программный разработчик

**Е. Д. Соложенцев,**

доктор техн. наук, профессор

Институт проблем машиноведения РАН

Дается краткое описание логико-вероятностных методик оценки, анализа риска и выбора портфеля ценных бумаг. Приводятся основные положения, формулы и модели. Описывается программный комплекс, реализующий эти методики. Приводятся результаты исследований на реальных данных, полученные с помощью разработанного комплекса.

A brief description of logical-and-probabilistic techniques of the assessment and analysis of risks and selection of security portfolio is given. The basics concepts, formulas and models are provided. Software implementing the techniques is described. The results of investigations on real data produced with application of the software are presented.

### Введение

В 1952 г. Г. Марковиц опубликовал фундаментальную работу, где предложил методику, с помощью которой можно подобрать состав оптимального по соотношению риска и доходности портфеля [1, 2]. За риск принималось стандартное отклонение распределения доходности портфеля как случайной величины, а оно лишь косвенно характеризует риск. Позднее широкое распространение получила мера риска *VaR* (Value-at-Risk). В отличие от стандартного отклонения, она дает информацию о величине возможных убытков. Разработано несколько методов расчета *VaR*, в которых, как правило, делается предположение о нормальном распределении доходности активов, однако эта гипотеза не выполняется на практике. В большом числе работ по *VaR* исследуется важнейшая часть распределения доходности портфеля, а именно его «хвост», для которого вводят разные типы распределений и допущения.

Перечисленные недостатки заставляют искать новые подходы к проблеме риска портфеля ценных бумаг. Ниже рассматривается логико-вероятностный подход, который базируется на логико-вероятностном исчислении (ЛВ-исчислении) и логико-вероятностных моделях (ЛВ-моделях) риска с группами несовместных событий (ГНС) [3–6]. Его преимуществом является то, что он работает с дискретными распределениями.

### ЛВ-подход к риску портфеля ценных бумаг

*База данных (БД) табличного типа* (табл. 1) содержит статистическую информацию о доходностях активов портфеля в разные моменты времени. В таблице БД количество столбцов равно количеству активов в портфеле.

*Модификация базы данных.* Диапазон изменения доходности каждого финансового инструмента разбивается на интервалы  $Z_{jr}$ . Число интервалов  $N_j$  в общем случае может быть разным. Пронумерованные интервалы рассматриваются как состояния актива  $r = 1, 2, \dots, N_j$ . Каждому активу  $j$  сопоставляется логическая переменная  $z_j$ . Каждому состоянию  $r$  актива  $j$  сопоставляется случайное событие-градация  $z_{jr}$ .

■ **Таблица 1.** Значения доходностей активов

Момент времени	Актив 1, доходность $Z_1$	...	Актив $j$ , доходность $Z_j$	...	Актив $n$ , доходность $Z_n$
1	$Z_{11}$	...	$Z_{j1}$	...	$Z_{n1}$
2	$Z_{12}$	...	$Z_{j2}$	...	$Z_{n2}$
...	...	...	...	...	...
$t$	$Z_{1t}$	...	$Z_{jt}$	...	$Z_{nt}$
...	...	...	...	...	...
$T$	$Z_{1T}$	...	$Z_{jT}$	...	$Z_{nT}$

Если раньше доходность могла принимать бесконечно много разных значений, то теперь множество доходностей каждого актива имеет количество разных элементов, равное числу градаций, т. е. эти множества конечны. После такого преобразования БД стало возможным применение ЛВ-исчисления с ГНС.

Каждое состояние каждого актива характеризуется средней доходностью на интервале  $Z_{jr}$  и вероятностью

$$P(z_{jr}) = p_{jr} = \frac{N_{jr}}{T}, \quad (1)$$

где  $N_{jr}$  — число попаданий доходности в интервал  $r$ ;  $T$  — число состояний портфеля в статистических данных.

Для отдельного актива его события-градации составляют ГНС. Сумма вероятностей событий-градаций в ГНС равна 1:

$$\sum_{r=1}^{N_j} P(z_{jr}) = \sum_{r=1}^{N_j} p_{jr} = 1. \quad (2)$$

Каждое состояние портфеля характеризуется уникальным набором состояний активов. Общее число возможных состояний портфеля

$$N = N_1 \cdot N_2 \cdot \dots \cdot N_j \cdot \dots \cdot N_n, \quad (3)$$

где  $N_1, \dots, N_j, \dots, N_n$  — число градаций доходности активов. Если число активов  $n = 10$  и доходность каждого актива  $N_j$  имеет 40 градаций, то число возможных разных состояний портфеля равно астрономическому числу  $N = 40^{10}$ .

Запишем логическую функцию (Л-функцию) для всех состояний портфеля:

$$y = y_1 \vee y_2 \vee \dots \vee y_i \vee \dots \vee y_N, \quad (4)$$

где каждое состояние определяется Л-функцией

$$y_i = z_{1r_1} \wedge \dots \wedge z_{jr_j} \wedge \dots \wedge z_{nr_n}. \quad (5)$$

Л-функции для любых двух состояний портфеля ортогональны, так как содержат хотя бы для одной переменной  $z_j$  разные события-градации. Таким образом, состояния портфеля также образуют ГНС и сумма их вероятностей равна 1.

Свойство ортогональности логических слагаемых Л-функции (4) позволяет перейти от Л-функций к алгебраическим выражениям с вероятностями, т. е. Л-переменные заменить на вероятности и знаки « $\vee$ » на знаки « $+$ ».

Каждое из состояний портфеля имеет доходность и вероятность. Доходность состояния  $i$

$$Y_i = x_1 Z_{1r_1} + \dots + x_j Z_{jr_j} + \dots + x_n Z_{nr_n}, \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (6)$$

где  $x_j$  — удельная доля актива  $j$  в портфеле. Сумма долей активов составляет 1:

$$\sum_{j=1}^n x_j = 1. \quad (7)$$

Вычисление вероятностей состояний портфеля не является тривиальной задачей. Здесь ключевую роль играет проблема учета зависимости между активами. Зная вероятности всех состояний портфеля, можно отсортировать их по возрастанию доходности и получить дискретное распределение (рис. 1), которое и несет в себе информацию о риске. Основными показателями являются минимально допустимая доходность  $Y_{ad}$  и уровень риска  $Risk$ . Эти параметры взаимозависимы, и если построено дискретное распределение, задав одну, всегда можно определить другую. Как известно, при использовании аналитических распределений эта задача не является тривиальной. Дополнительно к приведенным величинам также можно вычислить: среднюю ожидаемую доходность  $\bar{Y}$ , волатильность или стандартное отклонение  $\sigma$ ,  $VaR$  или стоимость под риском, минимально допустимую стоимость портфеля  $V_{ad}$ .

Выбор оптимального портфеля сводится к определению долей активов  $x_1, x_2, \dots, x_j, \dots, x_n$  при следующих возможных критериях оптимизации:

1) максимизация допустимой доходности портфеля  $Y_{ad}$  при заданном риске  $Risk$ :

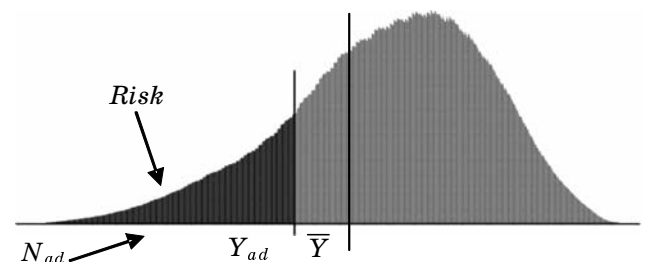
$$Y_{ad} \rightarrow \max; \quad Risk = \text{const}; \quad (8)$$

2) минимизация риска  $Risk$  при заданной допустимой доходности  $Y_{ad}$ :

$$Risk \rightarrow \min; \quad Y_{ad} = \text{const}. \quad (9)$$

Задача оптимизации портфеля является нелинейной и отличается большой вычислительной сложностью. Аналитически производные целевой функции по  $x$  вычислить невозможно. Решается она итеративно, алгоритмически. Предложены алгоритмы ее решения методом случайного поиска и методом градиентов. Их особенностью является учет для долей активов условия (7). Это существенно усложняет вычисление градиента целевой функции при оптимизации. На каждом шаге оптимизации значения  $x$  нужно нормировать.

Управление портфелем подразумевает периодическое изменение долей активов в соответствии с результатами оптимизации при выбранной модели риска. Реструктуризацию портфеля можно проводить каждый день, через два, три дня или неделю.



■ Рис. 1. Характеристики распределения доходности портфеля

Анализ риска портфеля осуществляется на основе расчета вкладов событий-градаций активов в риск и допустимую доходность. Вклады в допустимую доходность портфеля  $Y_{ad}$  равны

$$W_{jr} = \frac{N_{jr}}{N_{ad}}, \quad i = 1, 2, \dots, n; \quad r = 1, 2, \dots, N_j, \quad (10)$$

где  $N_{ad}$  и  $N_{jr}$  — соответственно число всех опасных состояний портфеля в «хвосте» и число состояний портфеля, содержащих градацию  $r$  актива  $j$ , удовлетворяющих условию

$$Y < Y_{ad}. \quad (11)$$

Вклады событий-градаций в Risk:

$$C_{jr} = \frac{P_{jr}}{Risk}, \quad j = 1, 2, \dots, n; \quad r = 1, 2, \dots, N_j, \quad (12)$$

где  $P_{jr}$  — суммарная вероятность состояний портфеля с градацией  $r$  актива  $j$ , удовлетворяющих условию (11).

Активы, имеющие большие вклады, наиболее опасны, и на них надо обратить особое внимание. Эти вклады могут явиться основой для принятия решения по исключению актива из состава портфеля и замене его другим.

### ЛВ-модели риска портфеля

При вычислении вероятности состояний портфеля важную роль играет учет зависимости между доходностями активов. Рассмотрены три модели риска портфеля: модель без учета зависимости, модель с полным учетом зависимости и модель с учетом зависимости от внешнего фактора.

При использовании ЛВ-модели без учета зависимости вероятность состояния  $i$  равна

$$p_i = P(y_i) = p_{1r_1} \cdot \dots \cdot p_{jr_j} \cdot \dots \cdot p_{nr_n}. \quad (13)$$

По (13) можно рассчитать вероятности всех возможных состояний портфеля (3). Поскольку это число может быть астрономически большим, с помощью метода Монте-Карло можно сгенерировать только небольшую их часть (несколько тысяч).

ЛВ-модель с полным учетом зависимости доходности активов использует многомерное совместное распределение. При этом вероятность состояния  $i$  портфеля по статистическим данным определяется следующим образом:

$$P_{1r_1-2r_2-\dots-nr_n} = \frac{N_{1r_1-2r_2-\dots-nr_n}}{N}, \quad (14)$$

где  $N_{1r_1-2r_2-\dots-nr_n}$  — число появлений комбинации состояний  $1r_1-2r_2-\dots-nr_n$ .

При использовании (14) вероятности только небольшой части возможных состояний портфеля будут отличны от 0, т. е. предоставляется информация не обо всех состояниях, а только о тех, которые встречались в истории. Для того

чтобы распределение доходности портфеля было достоверным, необходимо накопить информацию за достаточно большой период времени, что далеко не всегда представляется возможным.

ЛВ-модель риска с учетом зависимости доходности активов от фактора имеет следующее допущение: доходности активов не зависят друг от друга, но зависят от внешнего фактора. Для того чтобы проводить расчеты, необходима информация не только по ценам активов, но также об изменении этого фактора параллельно с ценами активов. Таким фактором может быть, например, индекс фондового рынка или доходность какой-то ценной бумаги. Фактор может иметь и другую природу: например, изменение уровня инфляции или любой другой экономической показатель, значение которого можно разбить на градации.

Для каждого актива строятся условные вероятностные распределения доходности относительно фактора  $f$  (табл. 2). Сумма вероятностей в каждом столбце равна 1. При этом вероятность  $p_{jr|f_k}$  — это частота появления в статистических данных градации  $z_{jr}$  актива  $j$  при условии, что фактор  $f$  имеет градацию  $f_k$ :

$$p_{jr|f_k} = P(z_j = z_{jr} | f = f_k). \quad (15)$$

Л-функция (4) описывает все состояния портфеля. Запишем Л-функцию состояния  $i$ :

$$y_i = \left[ (z_1 \wedge \dots \wedge z_j \wedge \dots \wedge z_n) | f = f_1 \right] \vee \dots \vee \left[ (z_1 \wedge \dots \wedge z_j \wedge \dots \wedge z_n) | f = f_k \right] \vee \dots \vee \left[ (z_1 \wedge \dots \wedge z_j \wedge \dots \wedge z_n) | f = f_K \right]. \quad (16)$$

Каждое из состояний портфеля составное. Его части — это тоже состояния портфеля, но при разных градациях фактора  $f$ . Все слагаемые ортогональны друг другу. Запишем формулу вероятности состояния портфеля  $i$ :

$$p_i = \left( p_{1r_1|f_1} \cdot \dots \cdot p_{jr_j|f_1} \cdot \dots \cdot p_{nr_n|f_1} \right) p_{f_1} + \dots + \left( p_{1r_1|f_k} \cdot \dots \cdot p_{jr_j|f_k} \cdot \dots \cdot p_{nr_n|f_k} \right) p_{f_k} + \dots$$

■ Таблица 2. Условные вероятностные распределения состояний актива относительно фактора  $f$

$z_j$	$f$				
	$f_1$	...	$f_k$	...	$f_K$
$z_{j1}$	$p_{j1 f_1}$	...	$p_{j1 f_k}$	...	$p_{j1 f_K}$
...	...	...	...	...	...
$z_{jr_j}$	$p_{jr f_1}$	...	$p_{jr f_k}$	...	$p_{jr f_K}$
...	...	...	...	...	...
$z_{jN_j}$	$p_{jN_j f_1}$	...	$p_{jN_j f_k}$	...	$p_{jN_j f_K}$

$$\left( p_{1r_1|f_k} \cdots p_{jr_j|f_k} \cdots p_{nr_n|f_k} \right) p_{f_k}, \quad (17)$$

где  $r_1 \in \{1, N_1\}$ ;  $r_j \in \{1, N_j\}$ ;  $r_n \in \{1, N_n\}$ ;  $k \in \{1, K\}$ .

Доходности состояний портфеля определяются выражением (6). С использованием (17) можно определить вероятности всех состояний портфеля. Как и в случае без учета зависимости, Л-функция помогает восстановить состояния, не встречавшиеся в статистике.

### Программный комплекс

Разработан программный комплекс, реализующий ЛВ-подход к риску портфеля ценных бумаг. Комплекс используется для управления инвестиционным портфелем. Основные функции комплекса:

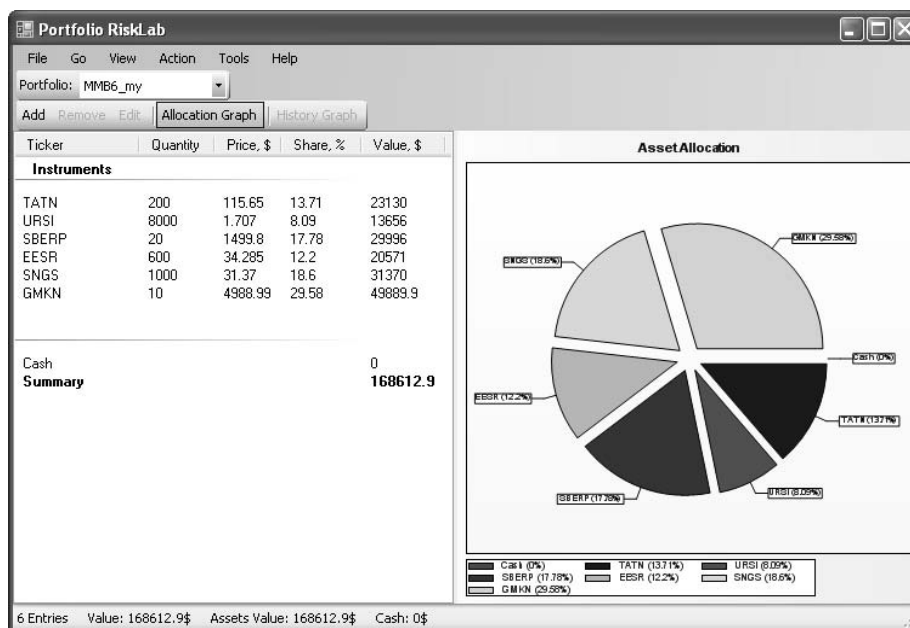
1. Поддержка и обновление БД с историей котировок ценных бумаг. Вывод графиков по ценам активов и портфеля.
2. Формирование портфеля ценных бумаг путем выбора активов и указания их количества; поддержка нескольких портфелей. Вывод параметров портфеля и позиций, в него входящих, согласно последним данным по ценам.
3. Моделирование риска портфеля несколькими способами.
4. Расчет характеристик и показателей риска портфеля, таких как минимально допустимая доходность, риск,  $VaR$  портфеля и волатильность.
5. Оптимизация структуры портфеля по критериям минимизации риска и максимизации допустимой доходности (8) и (9).
6. Тестирование управления портфелем на исторических данных с выводом показателей эффективности.

7. Верификация моделей риска на исторических данных для обеспечения возможности сравнения и выбора наиболее подходящей модели.

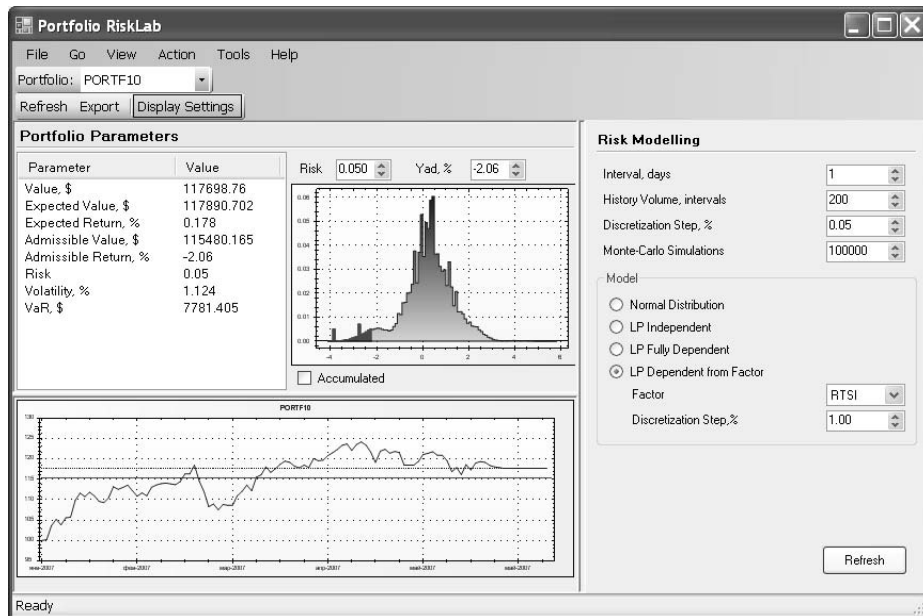
Комплекс имеет четыре режима работы: просмотр и редактирование портфелей, анализ риска, оптимизация, тестирование управления портфелем, верификация моделей риска. Внешний вид ПК в режиме *просмотра и редактирования портфелей* представлен на рис. 2. Поддерживается одновременно несколько портфелей. Можно создавать и удалять поименованные портфели. Позиции добавляются путем указания вида актива и количества. По каждому активу можно отобразить график изменения цены за указанный период и вывести следующую информацию: наименование инструмента, количество, последняя цена, стоимость, доля от объема капитала. По портфелю также рассчитываются стоимость; сумма денег, не вложенных ни в какие активы; стоимость активов.

Окно программы в режиме *анализа риска* представлено на рис. 3. Поддерживается моделирование риска портфеля четырьмя способами: без учета зависимости, с учетом зависимости от фактора, с полным учетом зависимости, с использованием нормального распределения с учетом корреляции.

Рассчитываются также следующие характеристики портфеля и показатели риска: минимально допустимая доходность  $Y_{ad}$  при заданном уровне риска  $Risk$ , риск при заданной минимально допустимой доходности,  $VaR$  портфеля, волатильность  $\sigma$ , средняя ожидаемая доходность  $\bar{Y}$ , минимально допустимая стоимость  $V_{ad}$ . Изображается график распределения доходности, на котором область, соответствующая риску, закрашивается



■ Рис. 2. Режим редактирования портфелей

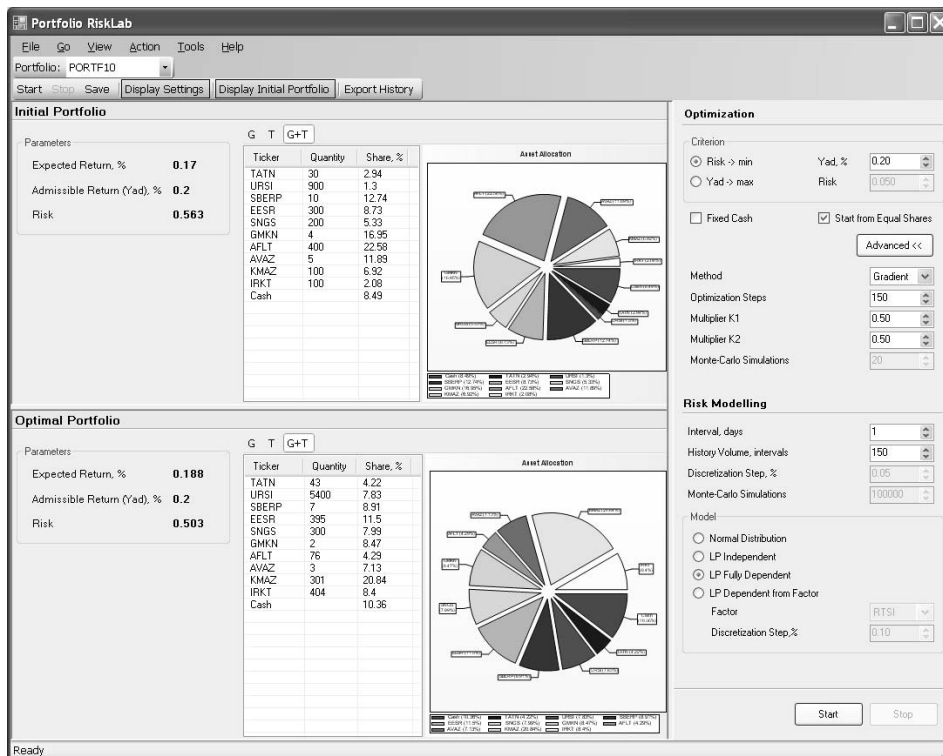


■ Рис. 3. Анализ риска портфеля

красным цветом. Под списком характеристик портфеля и изображением распределения доходности показано изменение стоимости портфеля за последнее время, если бы его состав не менялся. Пунктирной линией обозначена текущая стоимость, а сплошной — минимально допустимая стоимость

$V_{ad}$  для заданного уровня риска, т. е. стоимость, ниже которой портфель не опустится с вероятностью  $1 - Risk$ .

Режим *оптимизации портфеля* показан на рис. 4. Поддерживается оптимизация по критериям (8) и (9). Можно использовать как метод гра-



■ Рис. 4. Оптимизация портфеля ценных бумаг

диентов, так и метод случайного поиска. В процессе оптимизации выводятся составы исходного и оптимизируемого портфелей, а также некоторые показатели риска.

Точность расчета показателей риска портфеля, а следовательно, и правильность результатов оптимизации зависят от точности выбранной модели риска. При этом важен не только тип модели (поддерживается 4 типа), но и ее параметры. Например, большое значение имеет размер предыстории и шаг дискретизации фактора (для модели с учетом зависимости от фактора). Следовательно, встает проблема верификации моделей риска. Решается она следующим образом.

Суть метода заключается в проверке прогнозирующей функции модели. Для этого берется некоторый уровень риска, например  $Risk = 0,05$ . На протяжении заданного периода времени ежедневно (или через количество дней, равное горизонту прогнозирования) моделируется дискретное распределение доходности портфеля. С его помощью определяется минимально допустимая доходность портфеля  $Y_{ad}$ . На следующий день (или по прохождении периода, равного горизонту прогнозирования) фиксируется фактическая доходность портфеля  $Y$ . Она может быть как выше, так и ниже прогнозной  $Y_{ad}$ . Вычисляется частота отклонений в меньшую сторону:

$$\omega = N_{Y < Y_{ad}} / N, \quad (18)$$

где  $\omega$ ,  $N_{Y < Y_{ad}}$  — частота наблюдений и число наблюдений, когда фактическая доходность была ниже прогнозной;  $N$  — общее число наблюдений.

Значение частоты  $\omega$  должно быть как можно ближе к выбранному уровню риска  $Risk$ . Отклонение в ту или иную сторону свидетельствует о неточности модели. Так, слишком маленькая частота говорит, что данная модель завышает риск, большая — наоборот — занижает. Такие расчеты проводятся одновременно для нескольких уровней риска, например: 0,01; 0,05; 0,1; 0,3; 0,5; 0,7. Для удобства оценки точности и сопоставления моделей рассчитывается ошибка  $\Delta$ :

$$\Delta = \frac{\sum_{i=1}^m (\omega_i - Risk_i)^2}{m}, \quad (19)$$

где  $\omega_i$  — частота для уровня риска  $Risk_i$ ;  $m$  — количество уровней риска.

Уровни риска задаются в соответствии со стоящими целями. Так, при оценке возможных убытков ( $VaR$ ) важен «хвост» распределения доходности и берутся такие уровни риска как 0,01 и 0,05. Если планируется использование модели для оптимизации по критерию минимизации риска (9), то важна точность в диапазоне риска от 0,3 до 0,7.

В табл. 3 приведены результаты верификации моделей риска для портфеля из акций шести российских компаний (Татнефть-АО, Уралсвязьинформ-АО, Сбербанк-АО, РАО ЕЭС-АО, Сургутнефтегаз-АО, ГМК Норильский Никель). Брался 300-дневный период (с 8/11/2004 по 30/12/2005). Горизонт прогнозирования составил 1 день. Лучшие результаты показала модель с учетом зависимости от фактора. Следовательно, для целей оптимизации следует выбрать именно ее.

Помимо верификации моделей риска комплекс также дает возможность произвести *тестирование управления портфелем* на исторических данных. Окно программы в этом режиме представлено на рис. 5. Как уже было отмечено, под управлением подразумевается периодическое изменение долей активов в соответствии с результатами оптимизации при выбранной модели риска. Можно выбрать разные портфели или разные модели риска для одного и того же портфеля и сопоставить их эффективность. Также можно сопоставить результаты с неизменным портфелем либо единственным инструментом, например индексом рынка. Для управляемого портфеля учитывается комиссия за совершение операций купли/продажи ценных бумаг.

Приведем пример управления портфелем, состоящим из акций восьми крупных российских компаний (Аэрофлот, ГМК Норильский Никель, Иркутскэнерго, Лукойл, Ростелеком, РАО ЕЭС, Сбербанк-п, Татнефть). Взят период с 1/1/2005 по 1/6/2005. Использовалась модель с учетом зависимости от фактора (индекса РТС). Шаг дискретизации доходности фактора выбран на уровне 1%. Взята 70-дневная предыстория. Портфель оптимизировался по критерию максимизации минимально допустимой доходности для заданного уровня риска  $Risk = 0,05$  (8) каждый день.

В табл. 4 представлены показатели эффективности управления портфелем. Среди них коэффициенты Шарпа и Сортино, которые говорят, насколько доходность портфеля оправдана принятым уровнем риска. При расчете коэффициента

■ Таблица 3. Результаты сравнения моделей риска для целей оптимизации портфеля

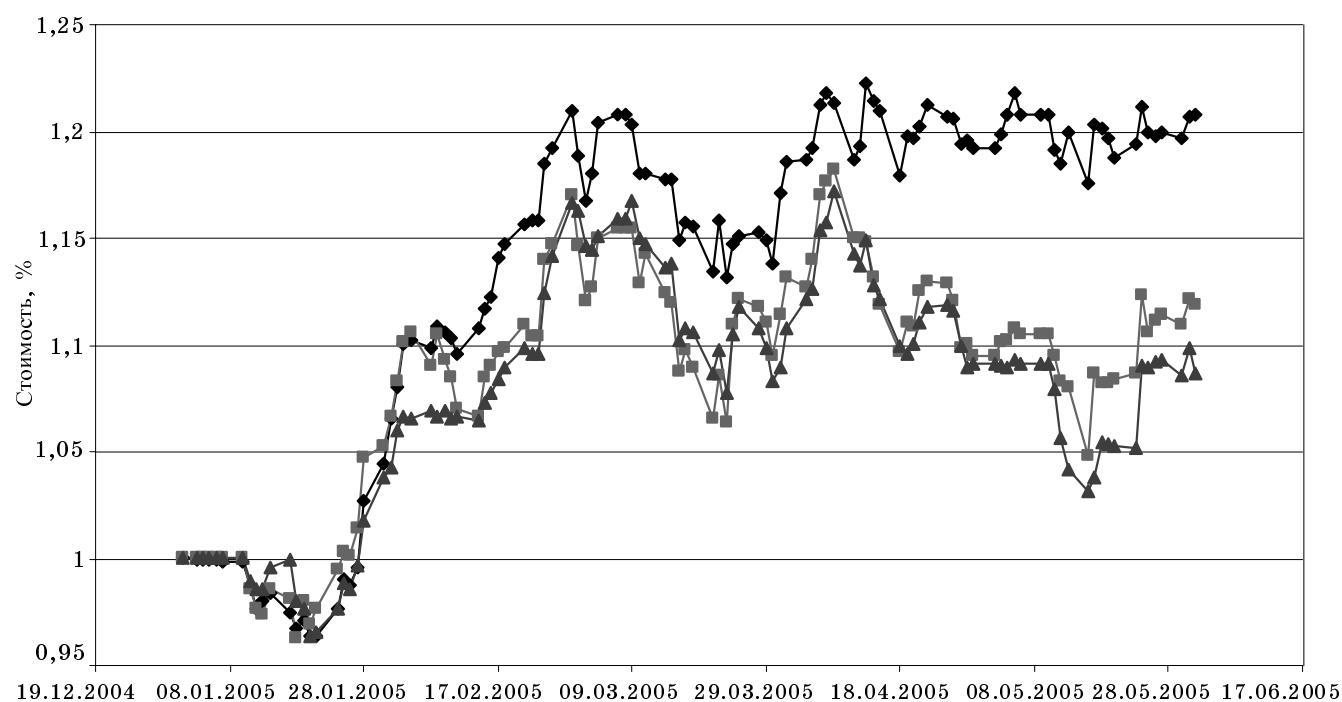
Модель	Уровень риска					
	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	$\Delta$
Без учета зависимости	0,31	0,39	0,45	0,52	0,62	0,003
С полным учетом зависимости	0,28	0,38	0,46	0,58	0,69	0,0006
С учетом зависимости от фактора	0,31	0,38	0,49	0,59	0,68	0,0002
Нормальное распределение с учетом корреляции	0,24	0,34	0,5	0,65	0,74	0,0022



■ Рис. 5. Тестирование управления портфелем

■ Таблица 4. Показатели эффективности управления портфелем

Позиция	Доход, %	Средняя доходность, % (недельная)	Стандартное отклонение доходности, % (недельное)	Коэффициент Шарпа	Коэффициент Сортино
Портфель неизменяемый	11,864	0,516	3,295	0,1	0,099
Портфель управляемый	20,743	0,868	2,717	0,251	0,433
Индекс РТС	8,634	0,425	3,089	0,078	0,09



■ Рис. 6. Графики изменения стоимости управляемого портфеля (◆), неизменяемого портфеля (■) и индекса РТС (▲)



Шарпа за риск принимается стандартное отклонение. У второго коэффициента берется стандартное отклонение «вниз», т. е. учитываются только те значения доходности, которые меньше минимально допустимой. Это делает данный коэффициент более предпочтительным. За минимально допустимую доходность взята безрисковая годовая ставка доходности (10 %). Для сравнения также приведены характеристики для неизменяемого портфеля и индекса РТС.

Приведенные результаты свидетельствуют об эффективности подхода. По доходности удалось значительно превысить индекс рынка и равновесный портфель, при этом стандартное отклонение доходности управляемого портфеля было ниже. Что касается коэффициентов Шарпа и Сортино, то они оказались выше в 3,2 и 4,8 раза соответственно. Также эффективность управления видна из графика изменения стоимости тестируемых позиций (рис. 6).

#### Выводы

1. Изложен ЛВ-подход к риску портфеля ценных бумаг с ГНС, главной идеей которого является

введение конечных множеств в БД по доходностям активов, что позволяет использовать ЛВ-исчисление и построить логические и вероятностные функции риска.

2. Сформулированы критерии оптимизации портфеля и разработаны алгоритмы оптимизации методом случайного поиска и градиентов.

3. Приведены формулы для анализа риска.

4. Разработаны следующие ЛВ-модели риска с ГНС:

- без учета зависимости между активами;
- с полным учетом зависимости между активами;
- с учетом зависимости доходности активов от внешнего фактора.

5. Предложена технология верификации и выбора параметров моделей риска.

6. Разработан программный комплекс, реализующий ЛВ-подход к риску портфеля, который может использоваться для управления реальным портфелем.

7. Расчетные исследования, проведенные с помощью программного комплекса, подтвердили эффективность разработанных моделей и методов.

#### Литература

1. Markowitz H. Portfolio selection // *Journal of Finance*. 1952. N. 7. P. 77–91.
2. Шарп У., Александер Г., Бойли Дж. Инвестиции: Пер. с англ. М.: ИНФРА, 2001.
3. Соложенцев Е. Д. Сценарное логико-вероятностное управление риском в бизнесе и технике. 2-е изд. СПб.: Издательский дом «Бизнес-пресса», 2006.
4. Алексеев В. В. Логико-вероятностный подход к риску портфеля ценных бумаг // Шестая научная сес-

сия аспирантов ГУАП: Сб. докл / СПб., СПбГУАП. 2003.

5. Алексеев В. В., Шоколов В. В., Соложенцев Е. Д. Логико-вероятностное моделирование портфеля ценных бумаг с использованием копул // *Управление финансовыми рисками*. 2006. № 3. С. 272–274.

6. Alexeev V. V., Shokolov V. V., Solojentsev E. D. Logical-and-probabilistic modeling of security portfolio and copulas // *Mathematical Economics*. Wroclaw, 2006. N 10.

**АЛЕКСЕЕВ**  
Вадим  
Вячеславович



Программный разработчик лаборатории «Интегрированные системы автоматизированного проектирования» Института проблем машиноведения РАН. В 2004 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения по специальности «Системы автоматизированного проектирования». Является автором восьми научных публикаций. Область научных интересов — финансовые риски.

**БАШУН**  
Владимир  
Владимирович



Ведущий программист отдела автоматизированных информационных систем Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. В 2004 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Является автором восьми научных публикаций. Область научных интересов — сжатие и передача видео, защита информации, криптография, беспроводная связь и сети без инфраструктуры.

**БЕЛЯЕВ**  
Евгений  
Александрович



Аспирант кафедры информационных систем Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. В 2005 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения по специальности «Автоматизированные системы обработки информации и управления». Область научных интересов — алгоритмы сжатия и передачи видеoinформации, цифровая обработка сигналов.

**БЕСТУГИН**  
Александр  
Роальдович



Доцент кафедры прикладной математики Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. В 1982 году окончил математико-механический факультет Ленинградского государственного университета им. А. А. Жданова. В 2000 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 50 научных публикаций и соавтором одной монографии. Область научных интересов — системы управления и связи.

**ГОРБАЦКИЙ**  
Владимир  
Владимирович



Старший преподаватель кафедры антенн и эксплуатации радиоэлектронной аппаратуры Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. В 1997 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения по специальности «Радиотехника». В 2007 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 25 научных публикаций, в том числе двух учебных пособий. Область научных интересов — адаптивные алгоритмы измерения параметров движения летательных аппаратов, антенны космических аппаратов.

**КАЛИНИЧЕНКО**  
Александр  
Николаевич



Доцент кафедры биомедицинской электроники и охраны среды Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ». В 1977 году окончил Ленинградский электротехнический институт им. В. И. Ульянова (Ленина). В 1989 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 80 научных публикаций. Область научных интересов — методы цифровой обработки и анализа биомедицинских сигналов.

**КРАСЮК**  
Владимир  
Николаевич



Профессор, заведующий кафедрой антенн и эксплуатации радиоэлектронной аппаратуры Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. В 1972 году окончил Ленинградский институт авиационного приборостроения. В 1987 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором более 400 научных публикаций. Область научных интересов — антенны возвращаемых космических аппаратов, малозаметных космических аппаратов, антенны миллиметрового диапазона длин волн, распространение волн в сложных средах.

**СЕРГЕЕВ**  
Антон  
Валерьевич



Ведущий программист отдела автоматизированных информационных систем Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. В 2004 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Является автором пяти научных публикаций. Область научных интересов — кодовые методы сжатия аудио-видео, беспроводная связь и сети инфраструктуры (ad hoc-сети), криптография, стенография.

**СОЛОВЬЕВ**  
Николай  
Владимирович



Старший преподаватель кафедры вычислительных систем и сетей Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. В 1979 году окончил Ленинградский политехнический институт по специальности «Автоматизация и комплексная механизация машиностроения». Является автором более 20 научных публикаций и четырех изобретений. Область научных интересов — распознавание образов, компьютерная обработка и анализ изображений, техническое зрение роботов.

**ПЕТУХОВ**  
Илья  
Сергеевич



Ассистент кафедры информатики и вычислительной техники Балтийского государственного технического университета «Военмех» им. Д. Ф. Устинова, аспирант. В 2005 году окончил Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д. Ф. Устинова. Является автором восьми научных публикаций. Область научных интересов — моделирование структурно-сложных технических систем.

**СМИРНОВА**  
Наталья  
Николаевна



Доцент, заведующая кафедрой информатики и вычислительной техники Балтийского государственного технического университета «Военмех» им. Д. Ф. Устинова. В 1971 году окончила Ленинградский механический институт. В 1984 году защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 30 научных публикаций. Область научных интересов — верификация сложного программного обеспечения.

**СОЛОЖЕНЦЕВ**  
Евгений  
Дмитриевич



Заведующий лабораторией интегрированных интеллектуальных систем автоматизированного проектирования Института проблем машиноведения РАН, профессор кафедры информационных технологий в экономике Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. Заслуженный деятель науки РФ. В 1960 году окончил Харьковский политехнический институт. В 1983 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором более 180 научных публикаций. Область научных интересов — моделирование, анализ и управление риском на стадиях проектирования, испытаний и эксплуатации банковских, организационных, экономических и технических систем.

**ТЮРЛИКОВ**  
**Андрей**  
**Михайлович**



Доцент кафедры информационных систем Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

В 1980 году окончил Ленинградский институт авиационного приборостроения по специальности «Информационные системы управления».

В 1986 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 60 научных публикаций.

Область научных интересов — многоабонентные системы связи, системы дистанционного обучения, протоколы передачи данных в реальном масштабе времени, алгоритмы сжатия видеоинформации.

**УХАНОВА**  
**Анна**  
**Сергеевна**



Студентка кафедры безопасности информационных систем Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, лауреат III Европейского конкурса на лучшую студенческую научную работу ISA (ESPC-2007). Является автором трех научных публикаций.

Область научных интересов — алгоритмы сжатия и передачи видеоинформации, системы электронных платежей.

**ШАРОВ**  
**Сергей**  
**Николаевич**



Начальник научно-аналитического отдела ОАО «Концерн „Гранит — Электрон“», профессор Балтийского государственного технического университета «Военмех» им. Д. Ф. Устинова, член-корреспондент Российской академии ракетно-артиллерийских наук, Российской академии электротехнических наук.

В 1962 г. окончил факультет систем автоматического управления Ленинградского механического института.

В 1981 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.

Является автором более 250 научных публикаций и около 130 изобретений.

Область научных интересов — нелинейные системы управления, информационные каналы движущихся объектов.

УДК 681.3.007

Возможности и целесообразность семантического сжатия информации дистанционного наблюдения

*Шаров С. Н.* Информационно-управляющие системы, 2007. № 6. С. 2–6.

На примере аппаратуры дистанционного наблюдения за поверхностью Земли и окружающей атмосферы показаны возможность и целесообразность семантического сжатия информации путем фильтрации ее по приоритетам важности и достоверности.

Список лит.: 8 назв.

УДК 681.325

Совмещение растровых изображений в системах технического зрения

*Козлов А. А., Литвинов М. Ю., Соловьев Н. В.* Информационно-управляющие системы, 2007. № 6. С. 7–10.

Рассмотрены методы совмещения растровых изображений при их одновременном воспроизведении на экране дисплея. Приведены результаты экспериментов, показывающие, что наилучшее визуальное восприятие дает пиксельное совмещение.

Список лит.: 3 назв.

УДК 004.94+681.51

Моделирование структурно-сложных технических систем для решения задач оценки надежности, безопасности и переключения технических средств

*Петухов И. С., Смирнова Н. Н.* Информационно-управляющие системы, 2007. № 6. С. 11–19.

Определяются требования к моделям, позволяющим анализировать надежность и безопасность сложных технических систем в аварийных ситуациях и выполнять эффективное переключение технических средств. Проводится анализ существующих подходов к построению таких моделей, рассматриваются их недостатки, описывается лишенный этих недостатков комплексный подход и разработанный впервые алгоритм поиска вариантов переключения.

Список лит.: 10 назв.

UDK 681.3.007

Possibility and expediency of semantic compression of the remote data viewing

*Sharov S. N.* IUS, 2007. N 6. P. 2–6.

The possibility and expediency of the semantic data compression by means of data filtering in accordance with levels of information significance and reliability is demonstrated by the example of the remote viewing equipment for the Earth surface and ambient air monitoring.

Refs: 8 titles.

UDK 681.325

Matching raster images in technical vision systems  
*Kozlov A. A., Litvinov M. Yu., Soloviev N. V.* IUS, 2007. N 6. P. 7–10.

We discuss some methods of matching raster images while displaying them on the monitor screen. The experiments' results show that the best visual perception is achieved through pixel matching.

Refs: 3 titles.

UDK 004.94+681.51

Complex technical systems modeling for solving tasks of reliability, safety and effective switching of equipment

*Petukhov I. S., Smirnova N. N.* IUS, 2007. N 6. P. 11–19.

The requirements for models that perform reliability and safety analysis of complex technical systems in emergency conditions and provide guidelines for effective switching of equipment are defined. The article includes an analysis of the known modeling approaches, reveals their disadvantages, describes a complex approach that doesn't have these disadvantages, and suggests an original brand new algorithm of equipment switching.

Refs: 10 titles.

## УДК 621.391

Модель и протокол передачи видеоданных в реальном времени по беспроводному каналу

*Башун В. В., Сергеев А. В.* Информационно-управляющие системы, 2007. № 6. С. 20–27.

Решается задача передачи сжатого потока видеоданных высокого качества в реальном времени по беспроводному каналу Ultra Wide Band с изменяющейся пропускной способностью. Основная цель — создание совместной схемы сжатия и передачи видеопотока, которая обеспечит приемлемый уровень качества восстановленного изображения при строгом ограничении на используемую память и задержку при передаче. Для выбора оптимальных параметров сжатия и передачи предложена и исследована специальная модель, позволяющая задавать ограничение на допустимое число потерянных строк (в потоке) и максимизировать качество восстановленного изображения по критерию *PSNR*.

Список лит.: 10 назв.

## УДК 621.391.1-681.3

Адаптивное арифметическое кодирование в стандарте JPEG 2000

*Беляев Е. А., Тюрликов А. М., Уханова А. С.* Информационно-управляющие системы, 2007. № 6. С. 28–33.

Представлен обзор контекстного моделирования, используемого в стандарте JPEG 2000. Описан способ модификации механизма адаптивной оценки вероятности появления символа, позволяющий учесть статистические особенности двоичных источников, соответствующих различным контекстным моделям, и тем самым повысить эффективность алгоритма.

Список лит.: 6 назв.

## УДК 621.396.67

Аналитические и экспериментальные исследования влияния диэлектрических покрытий на излучение апертурных антенн

*Бестугин А. Р., Горбачский В. В., Красук В. Н.* Информационно-управляющие системы, 2007. № 6. С. 34–40.

Исследовано влияние различных диэлектрических покрытий разных толщин и свойств на формирование диаграммы направленности излучения апертурных антенн. Исследования проводились для диэлектриков, располагаемых непосредственно в раскрыве антенны.

Список лит.: 5 назв.

## УДК 621.391

A model and protocol of real time video data transmission over a wireless channel

*Bashun V. V., Sergeev A. V.* IUS, 2007. N 6. P. 20–27.

A problem of real time high quality compressed video transmission over a variable UWB channel is being solved. The main goal is to create a joint compression and transmission scheme (jpeg progressive + ARQ protocol) that would provide an acceptable level of the restored video quality with severe requirements for the amount of memory used and transmission delay. To optimize the compression and transmission parameters, a new model that minimizes the number of dropped rows and maximizes the *PSNR* of reconstructed frames was proposed and developed.

Refs: 10 titles.

## УДК 621.391.1-681.3

Adaptive arithmetical coding in the JPEG 2000 standard

*Belyaev E. A., Tyurlikov A. M., Ukhanova A. S.* IUS, 2007. N 6. P. 28–33.

This is a review of context modelling used in the JPEG 2000 standard. We show how to modify the adaptive estimation mechanism of the probability of symbol appearance, taking into account the statistical peculiarities of binary sources corresponding to different context models and thus improving the algorithm.

Refs: 6 titles.

## УДК 621.396.67

Analytical and experimental researches on the influence of dielectric coating on the radiation of aperture aeriels

*Bestugin A. R., Gorbatskii V. V., Krasuk V. N.* IUS, 2007. N 6. P. 34–40.

The influence of various dielectric coatings of different thickness and properties on the construction of the orientation diagram of aperture aeriels radiation is investigated. A research was carried out for the dielectric coatings placed directly in the aperture of the aerial.

Refs: 5 titles.

УДК 615.471:617.7

О точности спектральных методов расчета показателей variability сердечного ритма

*Калиниченко А. Н.* Информационно-управляющие системы, 2007. № 6. С. 41–48.

Представлены результаты экспериментального исследования ошибки определения оценок частотных показателей variability сердечного ритма при использовании наиболее распространенных методов спектрального анализа: на основе быстрого преобразования Фурье и на основе модели авторегрессии. Показано, что как точность, так и статистическая устойчивость общепринятых спектральных показателей variability, рассчитанных по отдельной реализации сигнала, относительно невелики, что необходимо учитывать при практическом использовании данной методики.

Список лит.: 5 назв.

УДК 519.862.6

Логико-вероятностное моделирование риска портфеля ценных бумаг

*Алексеев В. В., Соложенцев Е. Д.* Информационно-управляющие системы, 2007. № 6. С. 49–56.

Дается краткое описание логико-вероятностных методик оценки, анализа риска и выбора портфеля ценных бумаг. Приводятся основные положения, формулы и модели. Описывается программный комплекс, реализующий эти методики. Приводятся результаты исследований на реальных данных, полученные с помощью разработанного комплекса.

Список лит.: 6 назв.

УДК 615.471:617.7

On the accuracy of spectral methods used to calculate the heart rate variability parameters

*Kalinichenko A. N.* IUS, 2007. N 6. P. 41–48.

The results of experimental estimation of the heart rate variability spectral parameters accuracy and validity are presented. Two groups of the spectral analysis methods were considered: FFT based and parametric (based on autoregressive model). It is shown that all the common methods provide comparatively high level of the spectral parameters estimation errors.

Refs: 5 titles.

УДК 519.862.6

Logical-and-probabilistic modeling of security portfolio risks

*Alekseev V. V., Solojentsev E. D.* IUS, 2007. N 6. P. 49–56.

A brief description of logical-and-probabilistic techniques of the assessment and analysis of risks and selection of security portfolio is given. The basics concepts, formulas and models are provided. Software implementing the techniques is described. The results of investigations on real data produced with application of the software are presented.

Refs: 6 titles.

# СОДЕРЖАНИЕ ЖУРНАЛА «ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ» за 2007 г. [№ 1–6]

	№	Стр.
Агиевич С. Н., Беспалов В. Л. Использование функций сплайн—Виленкина—Крестенсона для построения аналитических моделей радиосигналов .....	3	15
Алексеев В. В., Соложенцев Е. Д. Логико-вероятностное моделирование риска портфеля ценных бумаг .....	6	49
Андреев Е. Н., Вандюк Н. Ю., Волков Д. А., Коротков Д. А., Платонова М. Ю., Чубраева Л. И. Математическое и физическое моделирование процессов в сверхпроводниковых трансформаторах .....	1	25
Андреев С. Д., Семенов С. А., Тюрликов А. М. Методики оценки параметров радиоканала .....	4	37
Башун В. В., Сергеев А. В. Модель и протокол передачи видеоданных в реальном времени по беспроводному каналу .....	6	20
Беззатеев С. В., Литвинов М. Ю., Трояновский Б. К. Использование помехоустойчивых кодов для шифрации видеоинформации .....	5	23
Беляев Е. А., Тюрликов А. М., Уханова А. С. Адаптивное арифметическое кодирование в стандарте JPEG 2000 .....	6	28
Бестугин А. Р., Горбацкий В. В., Красюк В. Н. Аналитические и экспериментальные исследования влияния диэлектрических покрытий на излучение апертурных антенн .....	6	34
Бронштейн И. Г., Лившиц И. Л., Сергеев М. Б., Унчун Чо. Теория и практика расчета малогабаритных объективов для оптико-информационных систем .....	5	52
Ведерников Ю. В., Матросов В. В. Системный анализ. Взгляд на прошлое и настоящее .....	4	55
Великохатко Ю. П., Миронов А. А. Однозначно раскрашиваемые графы с минимумом ребер ....	4	13
Вельдер С. Э., Шалыто А. А. О верификации простых автоматных программ на основе метода Model Checking .....	3	27
Воробьев С. Н. Пересечение гауссова процесса с неслучайным уровнем .....	2	2
Дубаренко В. В., Кучмин А. Ю. Метод повышения качества наведения большого радиотелескопа миллиметрового диапазона с адаптивной зеркальной системой .....	5	14
Ерош И. Л., Сергеев А. М., Филатов Г. П. О защите цифровых изображений при передаче по каналам связи .....	5	20
Зикратов И. А., Зикратова Т. В. К вопросу об оптимизации зоны покрытия систем сотовой связи на загородных участках местности .....	3	52
Калиниченко А. Н. О точности спектральных методов расчета показателей variability сердечного ритма .....	6	41
Кацов И. В. Пространственное мультиплексирование с субсимвольным временным сдвигом между передающими антеннами .....	3	45
Клюха А. А., Морозова Т. Ю. Об одном методе анализа данных в задаче психологической диагностики .....	5	42
Козлов А. А., Литвинов М. Ю., Соловьев Н. В. Совмещение растровых изображений в системах технического зрения .....	6	7
Козлов А. В. Декодирование LDPC-кодов в дискретном канале flash-памяти .....	5	31
Крук Е. А., Прохорова В. Б. Расчет вероятностных характеристик для дискретных каналов с памятью .....	5	56
Кунгурцев В. В. Устойчивость протоколов информационного обмена в космических сетях связи и управления .....	1	52
Лебедев И. С. Способ формализации связей в конструкциях текста при создании естественно-языковых интерфейсов .....	3	23
Линский Е. М., Евсеев Г. С. Сравнение алгоритмов надежной передачи пакетов для сенсорных сетей .....	5	27
Мальцев Г. Н. Сетевые информационные технологии в современных спутниковых системах связи .....	1	33
Мальцев Г. Н., Цветков М. В. Принятие решения об остаточном ресурсе технической системы с использованием риск-анализа .....	2	50
Мироновский Л. А., Шинтяков Д. В. Частотные характеристики фазовращательных и бисингулярных систем .....	5	36
Молдованин Т. В. Решение задачи выбора оптимального варианта комплексной защиты информации с помощью метода экспертного оценивания .....	3	39
Нестеренко В. Д. Концепция построения архитектуры моделей процессов управления инфокоммуникационными сетями (Часть 2) .....	1	19
Новиков Ф. А., Степанян К. Б. Язык описания диаграмм .....	4	28
Обухова Н. А. Предварительная классификация изображения в задачах сегментации объектов ...	2	22



<b>Осипов Л. А., Кричевский А. М.</b> Оценка и применение моделей временных рядов с долгой памятью в экономических задачах .....	5	45
<b>Павлов В. С., Савинов М. В.</b> Синтез дискриминатора пеленгационной системы с эллипсообразным расположением точек приема .....	4	17
<b>Петухов И. С., Смирнова Н. Н.</b> Моделирование структурно-сложных технических систем для решения задач оценки надежности, безопасности и переключения технических средств .....	6	11
<b>Рыжиков Ю. И.</b> Расчет систем обслуживания с групповым поступлением заявок .....	2	39
<b>Рыжиков Ю. И.</b> Расчет систем со случайным выбором на обслуживание .....	3	56
<b>Савищенко Н. В.</b> Помехоустойчивость модемов с двумерными сигнальными конструкциями по точным формулам вероятности ошибки в канале без замираний и с общими четырехпараметрическими замираниями .....	4	44
<b>Сафронов В. В., Ведерников Ю. В., Матросов В. В., Умеренков С. А., Кравцов А. М.</b> Методика оптимизации структуры сложных технических систем в условиях риска .....	1	40
<b>Сергеев М. Б., Соловьев Н. В., Стадник А. И.</b> Методы повышения контрастности растровых изображений для систем цифровой обработки видеoinформации .....	1	2
<b>Степанов О. Г., Шалыто А. А., Шопырин Д. Г.</b> Предметно-ориентированный язык автоматного программирования на базе динамического языка RUBY .....	4	22
<b>Субочев С. Д.</b> Построение оптимальных траекторий в многомерных пространствах на основе физических моделей .....	2	29
<b>Тихонов Э. П.</b> Алгоритмическое описание и сравнительный анализ свойств сигма-дельта АЦП (Часть 1) .....	4	2
<b>Тихонов Э. П.</b> Алгоритмическое описание и сравнительный анализ свойств сигма-дельта АЦП (Часть 2) .....	5	2
<b>Тихонов Э. П.</b> Аналитико-имитационное исследование и оптимизация алгоритмов аналого-цифрового преобразования в условиях воздействия помех (Часть 1) .....	2	12
<b>Тихонов Э. П.</b> Аналитико-имитационное исследование и оптимизация алгоритмов аналого-цифрового преобразования в условиях воздействия помех (Часть 2) .....	3	2
<b>Тихонов Э. П.</b> Стохастический пространственный аналого-цифровой преобразователь и его связь с нейронными структурами .....	1	8
<b>Чернов В. Г.</b> Решение задач многокритериального альтернативного выбора на основе геометрической проекции нечетких множеств .....	1	46
<b>Шалыто А. А.</b> Визит Бертрана Мейера в Санкт-Петербург .....	1	55
<b>Шаров С. Н.</b> Возможности и целесообразность семантического сжатия информации дистанционного наблюдения .....	6	2
<b>АННОТАЦИИ</b> .....	1	62
<b>АННОТАЦИИ</b> .....	2	62
<b>АННОТАЦИИ</b> .....	3	62
<b>АННОТАЦИИ</b> .....	4	62
<b>АННОТАЦИИ</b> .....	5	63
<b>АННОТАЦИИ</b> .....	6	60
<b>СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ</b> .....	1	59
<b>СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ</b> .....	2	60
<b>СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ</b> .....	3	60
<b>СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ</b> .....	4	59
<b>СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ</b> .....	5	59
<b>СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ</b> .....	6	57
<b>Из прошлого через настоящее в будущее. Кафедре вычислительных систем и сетей ГУАП — 35 лет</b>	1	57
<b>III Всероссийская научно-техническая конференция «Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем-2008» (МЭС-2008)</b> .....	5	58
<b>V Санкт-Петербургская межрегиональная конференция «Информационная безопасность регионов России — ИБРР-2007»</b> .....	4	58
<b>VI Международная конференция «Авиация и космонавтика-2007»</b> .....	2	56
<b>XI Международный симпозиум по проблеме избыточности в информационных системах</b> .....	2	58