

ИНФОРМАЦИОННО- УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ



6(37)/2008

6(37)/2008

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. Шалыто,
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) 494-70-44

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: «Роспечать»: № 48060, № 15385; «Пресса России»: № 42476.

© Коллектив авторов, 2008

ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И УПРАВЛЕНИЕ

Молодяков С. А. Оптоэлектронные процессоры с ПЗС-фотоприемниками. Конвейерная обработка сигналов 2

Обухова Н. А., Тимофеев Б. С. Сегментация и сопровождение объектов в сложных условиях видеонаблюдения 9

Аль-Аммори А. Оценка эффективности способов повышения достоверности данных в информационно-управляющих системах при информационном резервировании 16

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ

Городецкий А. Е., Тарасова И. Л. Алгебраические методы получения и преобразования изображений при технической диагностике сложных систем в условиях неполной определенности (Часть 2) 22

Коновалов А. С., Якимовский Д. О. Управление электроприводами космических аппаратов в особых режимах 26

ПРОГРАММНЫЕ И АППАРАТНЫЕ СРЕДСТВА

Новиков Ф. А., Степанян К. Б. Использование порождающего программирования при реализации языка описания диаграмм 32

Первин А. Ю., Московский А. А. Виртуальные приложения для грид-вычислений 36

КОДИРОВАНИЕ И ПЕРЕДАЧА ИНФОРМАЦИИ

Андреев С. Д., Нилова А. В., Тюрликов А. М. Использование конкурентного опроса в широкополосных беспроводных сетях 44

ИНФОРМАЦИОННЫЕ КАНАЛЫ И СРЕДЫ

Макаренко С. И. Адаптивное управление скоростями логических соединений в канале радиосвязи множественного доступа 54

УПРАВЛЕНИЕ В МЕДИЦИНЕ И БИОЛОГИИ

Полонников Р. И., Вассерман Е. Л., Карташев Н. К. Автоматизированное распознавание электроэнцефалограмм с использованием метода анализа фрактальной динамики 59

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Кордеро Л. Метод активной многомодовой диагностики плазмы 62

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

65

АННОТАЦИИ

69

СОДЕРЖАНИЕ ЖУРНАЛА «ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ» за 2008 г. [№ 1–6] 73

ЛР № 010292 от 18.08.98.

Сдано в набор 31.10.08. Подписано в печать 20.12.08. Формат 60×84/8.

Бумага офсетная. Гарнитура SchoolBookS. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 8,6. Уч.-изд. л. 10,2. Тираж 1000 экз. Заказ 607.

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 004.386, 004.272

ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРОЦЕССОРЫ С ПЗС-ФОТОПРИЕМНИКАМИ. КОНВЕЙЕРНАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ

С. А. Молодяков,

канд. техн. наук, доцент

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Обсуждаются алгоритмы потоковой обработки информации в оптоэлектронных процессорах. Конвейерная обработка сигналов с применением ПЗС-фотоприемника в специальном режиме накопления позволяет существенно сжать поток данных на входе цифрового узла. Приводится одна из возможных реализаций оптоэлектронного процессора непрерывной обработки сигналов применительно к задаче радиоастрономии.

Ключевые слова — оптоэлектронный процессор, конвейер, фотоприемник на приборе с зарядовой связью, акустооптический анализатор спектра, аппаратная функция, пульсар.

Введение

В последнее десятилетие стремительно развиваются все направления вычислительной техники, особенно те, которые связаны с повышением скорости вычислений. Ввиду технологических ограничений на рост тактовых частот электронных процессоров все больше внимания уделяют исследованию и созданию архитектур отдельных процессоров, построенных на новых физических принципах, а также мультипроцессорных (многоядерных) систем с разнородными процессорами. Особое внимание привлекают оптические методы обработки информации. Одним из типов новых процессоров являются оптоэлектронные (ОЭ) процессоры, в которых высокие скорости и параллельность оптических преобразований сочетаются с традиционными электронными и цифровыми методами обработки. В рамках мультипроцессорных систем особенно эффективно применение таких гибридных ОЭ-процессоров на этапе предварительной обработки информации в системах обработки потоков данных в мультимедийных задачах, задачах астрономии, связи и др.

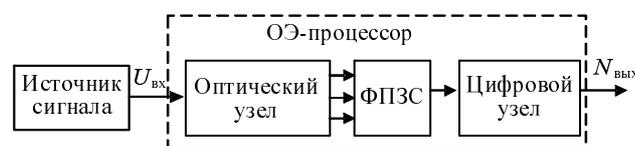
Наиболее общая структура ОЭ-процессора, обеспечивающего решение задач обработки сигналов, имеет вид, представленный на рис. 1.

Информация в ОЭ-процессор (сигнал $U_{\text{вх}}$) поступает в реальном времени с выхода источника сигналов. Оптический узел (оптический процессор) осуществляет практически в реальном времени интегральное преобразование над сигналом, вид которого определяется выбранной схемой. Пространственное распределение интенсивности све-

та регистрируется многоэлементным ПЗС-фотоприемником ФПЗС и в виде последовательности отсчетов сигналов вводится в цифровой узел. Цифровой узел (спецпроцессор) обеспечивает надежную и долговременную память, необходимую точность и гибкость алгоритмов обработки сигнала, возможность оперативно управлять режимом работы ФПЗС и оптического процессора. Результатом обработки потока входных данных является выходная информация $N_{\text{вых}}$.

Описанный ОЭ-процессор по классификации параллельных вычислительных систем Флинна можно рассматривать как векторный процессор класса SIMD [1]. Векторность достигается за счет использования оптического узла. Размер входного вектора оценивается для 1D-процессора в 1000 элементов, а для 2D-процессора — в 10^6 элементов.

Быстродействие ОЭ-процессора в первую очередь определяется быстродействием оптического процессора, которое обычно для фурье-процессора оценивают величиной 10^{17} флопсов [2]. Однако традиционные ограничения, связанные с медленными вводом и выводом информации из оптического узла, снижают быстродействие до величины 1 Гфлопс.



■ Рис. 1. Структурная схема ОЭ-процессора

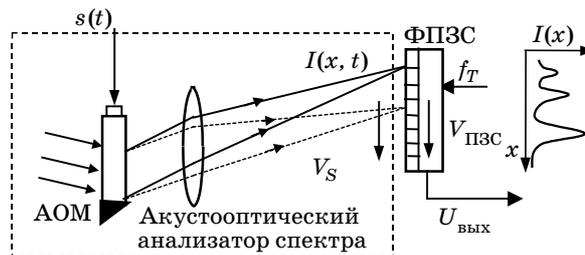
Особенно не хватает быстродействия при выводе, когда параллельную оптическую информацию фотоприемник преобразует в последовательную для цифрового узла.

Структуры оптических 1D- и 2D-устройств, особенно акустооптических, для спектральной и корреляционной обработки сигналов достаточно глубоко изучены как в России [3–7], так и за рубежом [8, 9]. Однако для эффективного применения оптической обработки информации необходимо использовать современные технологические достижения и разрабатывать новые алгоритмы распределенной потоковой обработки сигналов. Среди достижений по разработке компонент процессоров следует отметить создание: многоэлементных матриц лазерных излучателей с вертикальными резонаторами (vertical cavity surface emitting laser — VCSEL); ПЗС-фотоприемников с различной геометрией и архитектурой; фотоприемников на МОП-структурах, которые включают и сенсорную матрицу, и программируемую логику для размещения программ обработки; микропроцессоров с тактовыми частотами до 1 ГГц. Известен ОЭ-процессор EnLight 256 компании Lenslet (Израиль) [10]. Он содержит линейку 256 лазеров, матричный транспарант размерностью 256 × 256 элементов, выполнен на основе микротехнологии (MEMS), работает на тактовых частотах 125 МГц (производительность 8000 ГГц). Процессор доведен до уровня использования его в качестве процессора обработки сигналов, оснащен всем комплексом технических средств отладки и разработки программ (отладочный модуль, среда разработки).

При разработке ОЭ-процессора решаются три задачи: выбор типа оптического узла, определение режимов работы фотоприемника по обработке оптического сигнала и определение алгоритмов работы цифрового узла. При этом процессор цифрового узла полностью загружен операциями по управлению фотоприемником и потоковой обработкой отсчетов и является неотъемлемой частью ОЭ-процессора. В данной статье будет рассмотрен новый способ обработки сигналов в ОЭ-процессоре на примере задачи спектрального анализа. Будет показано преимущество этого способа, возможность его реализации с использованием линейного ФПЗС, а также его применение в радиоастрономии.

Конвейерная обработка сигналов в ОЭ-процессоре

Схема оптического узла рассматриваемого ОЭ-процессора соответствует традиционной схеме акустооптического спектроанализатора [5, 11] (рис. 2). Подлежащий обработке радиосигнал $s(t)$ после усиления подается на промежуточной частоте на акустооптический модулятор АОМ. АОМ и фурие-линза выполняют преобразование Фурье входного сигнала, формируя в выходной плоскости оптическое распределение с интенсивностью $I(x, t)$. Пространственная координата x линейно связана



■ Рис. 2. Схема оптического узла ОЭ-процессора

с частотой f анализируемых радиосигналов. Распределение $I(x, t)$ отражает спектр мощности $S(f)$ анализируемого сигнала $s(t)$ в скользящем окне длительностью T_A , где T_A — временная апертура АОМ. Распределение $I(x, t)$ детектируется и накапливается в ФПЗС, а затем считывается с частотой f_T .

В эквивалентной схеме аналоговой части ОЭ-процессора (рис. 3) выделены три узла и соответствующие им основные этапы преобразования: акустооптическое преобразование, накопление и перенос зарядовых пакетов в ФПЗС, последовательное считывание зарядов из выходного узла с усилением и аналого-цифровым преобразованием [7].

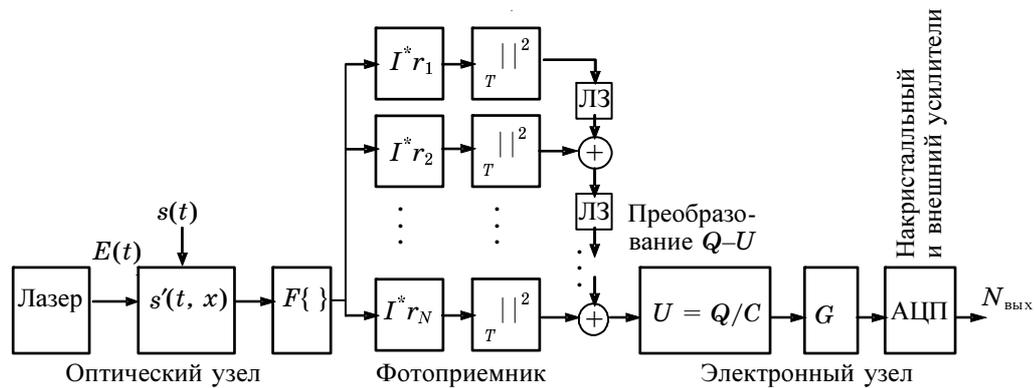
На первом этапе когерентное излучение проходит через акустооптический транспарант: $E(t) \times s(t - x / v(t))$, где s — входной сигнал; x — координата в плоскости транспаранта — АОМ; v — скорость волны в звукопроводе модулятора. На модуляторе происходит дифракция Брэгга, в фокальной плоскости фурие-линзы наблюдается сигнал, близкий к спектру входного сигнала: $S(\Omega) = F[s(t)]$. Этот сигнал взвешен аппаратной функцией спектроанализатора $h(x, \Omega)$. В плоскости фотоприемника наблюдается сигнал

$$I(x, t) = \int_{-\infty}^{\infty} S(\Omega, t) \cdot h(x, \Omega) d\Omega. \quad (1)$$

На втором этапе происходит детектирование, дискретизация и интегрирование оптического сигнала в элементах ФПЗС:

$$Q_i(n) = \int_0^{T_{int}} \int_{\Delta x} |I(t, x)|^2 \cdot r(x'_i - x) dx dt, \quad (2)$$

где $Q_i(n)$ — заряд в i -м элементе ФПЗС; $r(x)$ — апертурная функция элемента. Каждый из N элементов ФПЗС имеет свой коэффициент передачи. Третий этап — передача зарядовых пакетов по ФПЗС. Наличие линии задержки ЛЗ отражает последовательный по тактовым импульсам характер передачи. Четвертый этап соответствует преобразованию зарядового пакета в цифровой отсчет. Заряд Q претерпевает преобразование в выходном узле с емкостью C , усиливается в двух усилителях (G — коэффициент усиления) и преобразуется в аналого-цифровом преобразователе АЦП.



■ Рис. 3. Эквивалентная схема аналоговой части ОЭ-процессора

При обработке сигналов с линейно-частотной модуляцией (ЛЧМ), которые возникают в задачах связи, локации, радиоастрономии, сигнал $I(x, t)$ перемещается по элементам ФПЗС со скоростью, определенной параметрами самого сигнала. Для непрерывной регистрации такого перемещающегося изображения можно применить один из двух режимов сканирования — цифровое или аналоговое. Первый режим традиционный и широко применяется, второй — разрабатывается с участием автора и применяется в ОЭ-процессорах при решении различных задач.

Сравним эти режимы при использовании ОЭ-процессора в радиоастрономии для обработки сигналов пульсаров [12]. При цифровом сканировании за время прохождения сигнала пульсара по фотоприемнику необходимо зарегистрировать не менее 100 отдельных кадров с ФПЗС, а затем в цифровом процессоре обработки просуммировать их с компенсацией сдвига. Период следования импульсов для одного из ярких и широко наблюдаемых пульсаров PSR 1937+21 составляет 1,55 мс. Отсюда требуемое время считывания кадра с ФПЗС 15 мкс, а частота вывода для 1000-элементного фотоприемника — около 70 МГц. Максимальные же частоты вывода зарядовых пакетов из ФПЗС у лучших фирм мира (Dalsa, Sony) не превышают 40 МГц. Однако в процессоре Communication Research Laboratory, Japan [13] применено цифровое сканирование. В этой системе максимальная частота вывода зарядовых пакетов f_T составляет 20 МГц, при этом пространственное разрешение уменьшено до 256 элементов. Другими недостатками такого подхода являются: перерывы в сеансах регистрации сигналов, необходимые для цифровой обработки кадров; повышенный уровень собственных шумов ОЭ-процессора, связанный с процессами неэффективности переносов и считывания из выходного узла ФПЗС [14].

При аналоговом сканировании зарядовые пакеты в ФПЗС-регистре перемещаются синхронно и параллельно с перемещением изображения по фотоприемнику: $V_{ПЗС} = V_S$. Скорость движения $V_{ПЗС}$ элементов ПЗС определяется внешним управлением (частотой f_T): $V_{ПЗС} = lf_T$, где l — шаг распо-

ложения элементов. В процессе перемещения в зарядовых пакетах происходит накопление, а значит и увеличение заряда. На выходе ФПЗС формируется сигнал, соответствующий огибающей радиоимпульса. ФПЗС в этом случае работает в режиме временной задержки и накопления — ВЗН (time delay and integrating — TDI) [15]. Полное время накопления сигнала $T_S = f_T N$, где N — количество элементов в регистре ФПЗС. В этом случае ОЭ-процессор работает в конвейерном режиме с двумя этапами: накопление кадра зарядовых пакетов с одновременным суммированием с зарядами предыдущего кадра, перенос пакетов на один ПЗС-элемент и снова первый этап. Конвейерное накопление зарядов соответствует классу MISD (конвейерных процессоров) в классификации Флинна [1]. Конвейерный режим существенно упрощает аппаратуру цифровой регистрации, позволяет использовать линейный ФПЗС с большим количеством элементов (более 1000). Для пульсара PSR 1937+21 частота конвейера (частота вывода из ФПЗС) составляет около 100 кГц, что легко получить для всех линейных фотоприемников.

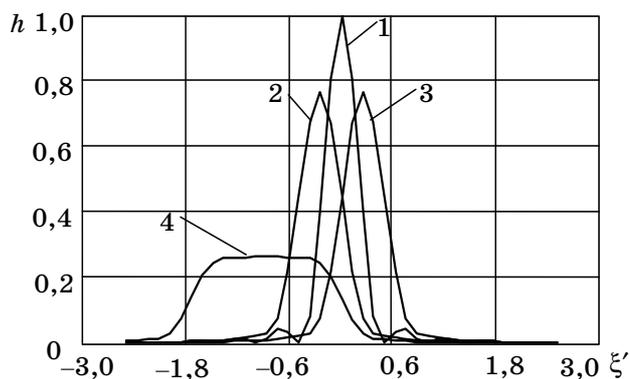
Несинхронность конвейера

Рассмотрим влияние на аппаратную функцию процессора рассогласование скорости сканирования (конвейера) $V_{ПЗС}$ и скорости перемещения сигнала V_S , считая, что сигнал ведет себя как ЛЧМ-сигнал: $V_S = V_{ЛЧМ}$. ЛЧМ-сигнал с длительностью $T_C \gg T_A$ можно записать: $s(t) = s_0 \cos(2\pi f_0(t - T_C/2) - \mu_0(t - T_C/2)^2)$, где s_0 — амплитуда; $\mu_0 = 2\pi \Delta f_S / T_C$ — крутизна ЛЧМ-сигнала, здесь Δf_S — полоса частот, равная полосе АОМ.

Определим аппаратную функцию процессора в движущейся со скоростью $V_{ПЗС}$ системе координат ξ в случае приближения равномерной засветки и пренебрежения квадратичного набега фаз [16]:

$$h(\xi) = \frac{1}{T_C} \int_0^{T_C} \int_{-1/2}^{1/2} \exp\left(i \frac{L}{F\lambda} x \left(\xi - \Delta V \left(t - \frac{T_A}{2} \right) \right)\right) dx dt, \quad (3)$$

где L — пространственная апертура АОМ; F — фокусное расстояние линзы; λ — длина волны све-



■ Рис. 4. Аппаратная функция процессора: 1 — оптимальная частота конвейера; 2, 3 — отстроенная на 0,5%; 4 — отстроенная на 2%

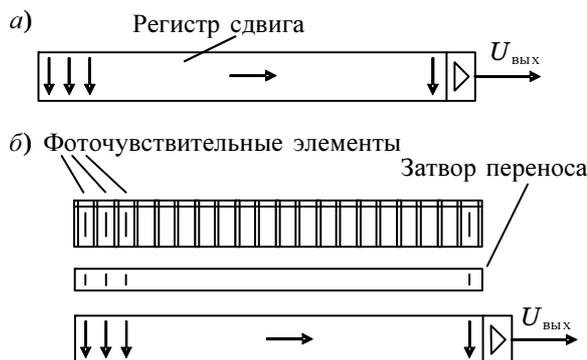
та; x — нормированная координата в плоскости АОМ; $\Delta V = V_{\text{лчм}} - V_{\text{пзс}}$ — рассогласование скоростей. $V_{\text{лчм}} = \mu_0 l / \delta f_l$, где δf_l — шаг частотной шкалы. Во временной области $h(t) = h(\xi / V_{\text{пзс}})$.

Аппаратные функции, рассчитанные по формуле (3) при разных частотах конвейера (отстроенных от оптимальной), представлены на рис. 4. Координата нормирована на ширину аппаратной функции процессора $\xi' = \xi / \delta f_A$. Если движение зарядов в ФПЗС синхронно с движением сигнала: $\Delta V = 0$, то аппаратная функция конвейерного процессора является функцией $\text{sinc}^2(k\xi)$. Видно, что при рассогласовании наблюдается уширение, уменьшение амплитуды и смещение аппаратной функции. Необходима точная настройка (не хуже 0,5%) частоты конвейера на скорость изменения частоты сигнала.

Реализация режима конвейерной обработки

Применение конвейерного режима связано с решением двух вопросов: организации режима ВЗН в фотоприемнике и его использования в рамках ОЭ-процессора. Известны специализированные матричные ВЗН-фотоприемники, которые применяются, в частности, в системах наблюдения участков небесной сферы при неподвижном телескопе. Такие ФПЗС выпускаются преимущественно фирмами Dalsa, Reticon, Texas Instruments и др. Для организации конвейерного накопления в линейных ФПЗС возможно использовать широко выпускаемые фотоприемники, предназначенные для покадрового вывода изображений.

Можно выделить две основные схемы линейных ФПЗС для организации режима ВЗН: с одним регистром накопления и сдвига (отечественный ФПЗС-1Л) и с выделенным регистром накопления (фотоприемник ILX703A фирмы Sony). В первой схеме (рис. 5, а) накопление и перенос зарядовых пакетов происходит в регистре сдвига и вывода; режим ВЗН всегда реализуется. Во второй схеме (рис. 5, б) накопление зарядов происходит в фоточувствительных элементах выделенного регистра накопления, затем заряд переносится в регистр

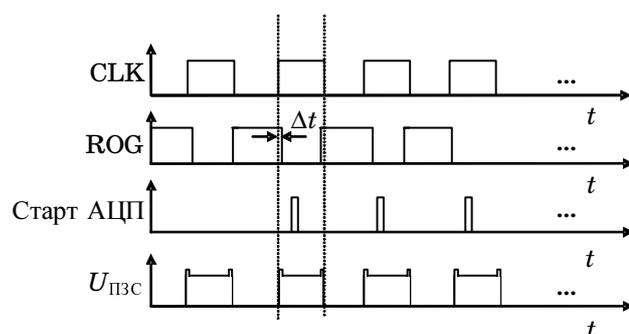


■ Рис. 5. Типовые структуры линейных ФПЗС: а — однорегистровые; б — с выделенным регистром накопления

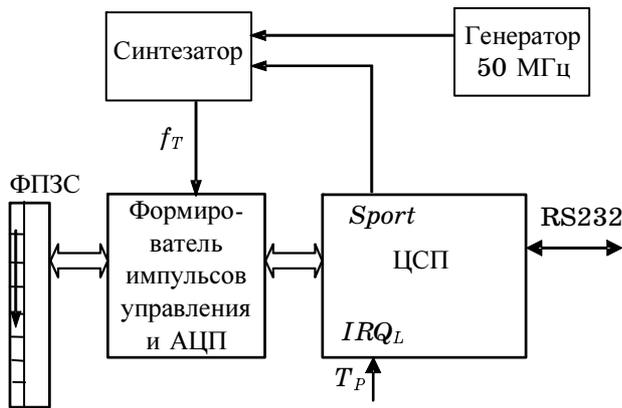
сдвига, сдвигается на один элемент, новый заряд из регистра накопления переносится в регистр сдвига, где он суммируется с имеющимися зарядами, сдвигается и т. д. Чаще всего в регистре накопления используются фотодиоды. Не каждый фотоприемник с выделенным регистром накопления позволяет реализовать ВЗН-режим.

Мы уже несколько лет используем ФПЗС ILX703 фирмы Sony для конвейерной обработки сигналов. Схема линейки ФПЗС аналогична схеме на рис. 5, б. Режим ВЗН является нестандартным для данного фотоприемника. Временная диаграмма сигналов представлена на рис. 6. Сигнал CLK обеспечивает сдвиг на один элемент зарядовых пакетов в выходном регистре. Сигнал ROG подается на регистр переноса и обеспечивает перенос зарядов из регистра накопления в выходной регистр сдвига. Экспериментально определены временные соотношения сигналов CLK и ROG. Отрицательный импульс ROG должен быть вложен в положительный импульс CLK. Время Δt должно быть не меньше 100 нс. На диаграмме показана форма сигнала с выхода ФПЗС, которая отличается от формы сигнала кадрового режима, и момент запуска АЦП.

Для применения конвейерной обработки сигналов в цифровую часть ОЭ-процессора были включены (рис. 7): целочисленный цифровой сигнал



■ Рис. 6. Временная диаграмма сигналов ВЗН управления ФПЗС ILX703



■ Рис. 7. Структурная схема цифровой части конвейерного ОЭ-процессора

ный процессор ЦСП ADSP2181; формирователь импульсов управления ФПЗС; синтезатор (DDS AD9835) тактовой частоты f_T , программируемый от ЦСП. Связь с ЭВМ поддерживается через интерфейс RS232. Формирователь импульсов по тактовым импульсам f_T вырабатывает сигнал старта АЦП и два сигнала управления: ROG и CLK (см. рис. 6). В схеме реализована возможность переключать по команде из компьютера режим работы — конвейерную или кадровую обработку сигналов. ЦСП выполняет следующие функции обработки: двойную цифровую коррелированную выборку; формирование виртуальных элементов за счет суммирования отсчетов; синхронное с периодом повторения сигналов суммирование кадров в 32-разрядных словах; непрерывный потоковый ввод отсчетов и вывод их в ЭВМ без потери входной информации.

В процессе работы зарядовые пакеты непрерывно выводятся с ФПЗС, также непрерывно после АЦП отсчеты поступают в ЦСП, который их считывает по прерыванию от АЦП. Для выделения кадров, которые соответствуют периоду входных импульсов, используется внешний импульс T_p . Особенность описанной схемы заключается в отсутствии синхронизации между импульсом периода кадров T_p и импульсами с ФПЗС. В результате точность определения момента прихода входного сигнала определяется временем одного отсчета с фотоприемника (период импульса CLK).

Применение конвейерного ОЭ-процессора для наблюдения пульсаров на радиотелескопе РТ-64

В астрофизике и наблюдательной радиоастрономии одним из объектов исследований являются пульсары, представляющие собой нейтронные звезды с высокой и очень стабильной скоростью вращения. Импульсное радиоизлучение пульсаров наблюдается в широком диапазоне частот от 100 МГц до 10 ГГц с периодом повторения импульсов T_p от единиц миллисекунд до единиц секунд. Радиоизлучение пульсаров имеет ряд особенностей, глав-

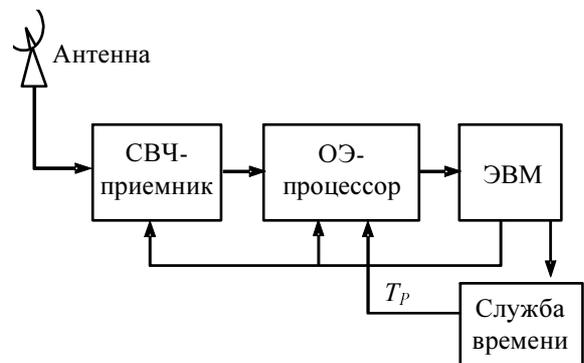
ная из которых — дисперсия в межзвездной среде [12]. Из-за дисперсии короткий импульс радиоизлучения пульсара перемещается по частоте в полосу приема Δf с центральной частотой f от высоких частот к низким со скоростью

$$\alpha_{DM} = \frac{f^3}{8,3 \cdot 10^3 DM}, \quad (4)$$

где DM — мера дисперсии пульсара, парсек/см³; f — частота, МГц. Каждый пульсар имеет свою DM и, следовательно, свою скорость перемещения по фотоприемнику. В некоторой полосе частот импульсы пульсаров можно представить в виде ЛЧМ-импульсов. Для обработки этих импульсов можно использовать ОЭ-процессор с конвейерным режимом обработки.

Нами был разработан рабочий макет ОЭ-процессора. В нем использовался He-Ne-лазер ЛГН-207А, АОМ, выполненный на кристалле TeO₂ с временной апертурой $T_A = 15$ мкс, и линейный ФПЗС ILX-703А (Sony), имеющий 2048 элементов размером 14×14 мкм. Акустооптический процессор имел центральную частоту $f_0 = 150$ МГц, рабочую полосу частот $\Delta f_A = 80$ МГц и шаг следования частотных каналов $\delta f_i \approx 82$ кГц. ЦСП программированием синтезатора на разные тактовые частоты f_T обеспечивал перестройку процессора для обработки сигналов пульсаров с мерой дисперсии от 15 до 1000 парсек/см³.

Установлен ОЭ-процессор в пульсарном приемном комплексе радиотелескопа РТ-64 с диаметром антенны 64 м Калязинской радиоастрономической обсерватории ФИАН [17] (рис. 8). Малые плотности потоков большинства пульсаров (порядка 10^{-28} Вт/(м²·Гц) на частоте 1,4 ГГц) требовали дополнительного накопления сигналов по большому числу (до 10^5 и более) периодов для получения отношения сигнал / шум > 1 . Полное время накопления для получения профиля одного импульса достигало 2 ч, причем в ЦСП сигналы накапливались в течение 3 мин. Работа ЦСП синхронизировалась по импульсам «период пульсара»



■ Рис. 8. ОЭ-процессор в приемном комплексе радиотелескопа

T_p . Специальная система синхронизации (Служба времени) рассчитывала ожидаемые моменты прихода импульсов излучения пульсаров, учитывая изменения периода из-за вращения Земли и другие факторы.

С помощью разработанного процессора в диапазоне 1,4 ГГц были проведены успешные наблюдения ряда пульсаров, как секундных, так и миллисекундных, одновременно и синхронно с их регистрацией в диапазоне 600 МГц на штатном фильтровом комплексе АС-600/160 ФИАН. Профили импульсов представлены в таблице. Время получения профиля для разных пульсаров различно и определяется плотностью потока S излучения пульсара. Если для первых двух пульсаров это время составляло 10–15 мин, то для слабых ($S = 2-4$ мЯн) миллисекундных пульсаров PSR 0613–02, 1640+22, 1643–12 время интегрирования достигало 2 ч. Профиль импульсов миллисекундного пульсара PSR 1713+07 выделялся из-под шума уже за 10–20 мин и существенно лучше, чем на фильтровом приемнике. Формы профилей импульсов пульсаров,

полученные на разных комплексах, несколько отличаются (особенно для пульсара PSR 0613–02), что связано с разными частотными диапазонами, на которых работают эти устройства. Наблюдается более низкое отношение сигнал/шум у ОЭ-процессора, так как в диапазоне 1,4 ГГц плотность потока излучения значительно меньше, чем на частоте 0,6 ГГц.

Особенность конвейерной работы предполагает, что в процессе регистрации сигналов от миллисекундных пульсаров по ФПЗС одновременно перемещаются несколько импульсов, для PSR 1937+21 таких импульсов пять. В случае секундных пульсаров по ФПЗС проходит один импульс. Представленные результаты наблюдений пульсаров (см. таблицу) позволяют сделать выводы о работоспособности рассмотренного ОЭ-процессора, а также о видимости приведенных пульсаров на радиотелескопе, выбрать пульсары для задач одновременных наблюдений на разных частотах. Более подробно результаты наблюдений представлены в работе [18]. Применение ОЭ-процессора для решения задачи измерения меры дисперсии DM показано в работе [19]. В настоящее время ведутся исследования по улучшению стабильности работы описанного ОЭ-процессора, связанные с разработкой методов учета дрейфов оптического узла.

Сравнение профилей пульсаров, полученных на радиотелескопе РТ-64 (г. Калязин) при одновременных наблюдениях на двух пульсарных комплексах

Пульсар	ОЭ-процессор	АС600/160
1. PSR 0329+54 $DM = 26,8$ $T_p = 0,714$ с $S = 203$ мЯн		
2. PSR 1937+21 $DM = 71,02$ $T_p = 1,55$ мс $S = 16$ мЯн		
3. PSR 1713+07 $DM = 15,993$ $T_p = 4,57$ мс $S = 4$ мЯн		
4. PSR 0613–02 $DM = 38,785$ $T_p = 3,06$ мс $S = 2,5$ мЯн		
5. PSR 1640+22 $DM = 18,415$ $T_p = 3,163$ мс $S = 3,5$ мЯн		
6. PSR 1643–12 $DM = 62,4$ $T_p = 4,62$ мс $S = 3$ мЯн		

Заключение

В статье рассмотрен ОЭ-процессор, в котором данные можно обрабатывать в реальном времени не только параллельно, но и конвейерно; продемонстрирована его работа на радиотелескопе РТ-64.

Перспективы использования таких процессоров для обработки сигналов связаны с улучшением параметров, применением новых оптических вычислителей и быстродействующих цифровых процессоров, а также с разработкой новых методов и алгоритмов обработки. Так, ведутся работы по созданию 2D-оптического вычислителя с использованием 2-канального АОМ. Это позволит реализовать в оптике совместное преобразование Фурье двух радиосигналов ортогональных поляризацій, определить их фазовые соотношения и поляризационные характеристики. В качестве ядра цифровой части рассматривается быстродействующий сигнальный процессор BlackFin (600 МГц).

Автор выражает благодарность коллегам Центра оптоэлектронных проблем информатики СПбГПУ за совместную работу и участие в разработке и применении ОЭ-процессора, сотрудникам ФИАН доктору физ.-мат. наук Ю. П. Илясову и канд. техн. наук В. В. Орешко за организацию и участие в наблюдениях на радиотелескопе РТ-64. Автор особенно благодарен организатору работ — руководителю Центра доктору физ.-мат. наук Н. А. Есепкиной.

Работа поддержана грантами РФФИ № 07-02-01211 и № 06-08-00090.

Литература

1. Таненбаум Э. Архитектура компьютера. СПб.: Питер, 2002. 704 с.
2. Vanderlugt A. Optical Signal Processing. N. Y.: J. Wiley Inc., 1992. 506 p.
3. Кулаков С. В. Акустооптические устройства спектрального и корреляционного анализа сигналов. Л.: Наука, 1978. 144 с.
4. Егоров Ю. В., Наумов К. П., Ушаков В. Н. Акустооптические процессоры. М.: Радио и связь, 1991. 160 с.
5. Парыгин В. Н., Балакший В. И. Оптическая обработка информации. М.: Изд-во МГУ, 1987. 142 с.
6. Ушаков В. Н. Акустооптические процессоры корреляционного типа. М.: Радиотехника, 2007. 184 с.
7. Хименко В. И., Тигин Д. В. Статистическая акустооптика и обработка сигналов. М.: Изд-во СПбГУ, 1996. 292 с.
8. Bradley G. Voone. Signal Processing Using Optics // Fundamentals, Devices, Architectures, and Applications. Oxford University Press, 1997. 416 p.
9. Jeiping Xu, Stroud R. Acousto-Optic Devices // Principles, Design and Applications. Wiley-Interscience, 1992. 672 p.
10. <http://www.lenslet.com>
11. Есепкина Н. А., Лавров А. П., Молодяков С. А. Акустооптический компенсатор дисперсии для сжатия импульсов радиоизлучения пульсаров // Изв. вузов России. Сер. Радиоэлектроника. 1998. Вып. 2. С. 21–29.
12. Манчестер Р., Тейлор Дж. Пульсары. М.: Мир, 1980. 315 с.
13. Hanado Y., Imae M., Sekido M. Millisecond Pulsar Observation System Using Acousto-Optic Spectrometer // IEEE Trans. On Instrum. and Measurement. 1995. Vol. 44. N 2. P. 107–109.
14. Holst G. C. CCD arrays, cameras and displays. SPIE Press, 1998. 375 p.
15. Барб Д. Ф. Режим задержки и интегрирования в приемниках изображения // Полупроводниковые формирователи сигналов изображений: Сб. ст. / Под ред. П. Йесперса. М.: Мир, 1979. С. 499–510.
16. Лавров А. П., Молодяков С. А. Оптоэлектронный пульсарный процессор и его аппаратная функция // Вычислительные, измерительные и управляющие системы: Тр. СПбГПУ; Ф-т техн. киберн. СПб., 2004. С. 114–119.
17. Есепкина Н. А., Лавров А. П., Молодяков С. А. и др. Применение акустооптического процессора для наблюдения радиоизлучения пульсаров // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. Вып. 21. С. 32–39.
18. Есепкина Н. А., Лавров А. П., Молодяков С. А. Акустооптический компенсатор дисперсии для наблюдения радиоизлучения пульсаров // Антенны. 2006. № 7. С. 69–76.
19. Esepkina N. A., Lavrov A. P., Molodyakov S. A. Acoustooptical pulsar processor usage for interstellar medium dispersion measurements // Proc. SPIE. 2005. Vol. 5447. P. 288–295.

УДК 621.397.13:656.021

СЕГМЕНТАЦИЯ И СОПРОВОЖДЕНИЕ ОБЪЕКТОВ В СЛОЖНЫХ УСЛОВИЯХ ВИДЕОНАБЛЮДЕНИЯ

Н. А. Обухова,

канд. техн. наук, доцент

Б. С. Тимофеев,

доктор техн. наук, профессор

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Рассмотрен метод сегментации и сопровождения объектов на основе их слоевого представления. Метод реализует автоматический захват нескольких объектов на неоднородном фоне и их устойчивое сопровождение в сложных динамических сценах. Описаны априорная и апостериорная оценки достоверности векторов движения, а также анализ траекторий объектов интереса на этапе сопровождения, обеспечивающие применение метода слоевого представления при низких соотношениях сигнал/шум в исходных видеоданных.

Ключевые слова — сегментация, сопровождение, слоевое представление, векторы движения, апостериорная достоверность, субпиксельная оценка векторов движения.

Введение

В проблеме сопровождения объектов на сложном фоне телевизионными методами выделим следующие задачи:

- первоначальная сегментация объектов;
- сопровождение объекта в условиях динамики его свойств, а также взаимодействия с другими объектами и фоном.

В одном кадре видеоряда сегментацию объектов осуществляют по признакам яркости, локальной детальности (сгусткам высокочастотной энергии) и формы. Анализ видеопоследовательности позволяет использовать признак движения. Учет признака движения обеспечивает устойчивую сегментацию областей изображения, принадлежащих движущимся объектам на неподвижном, в том числе сложном, фоне.

Традиционно для оценки признака движения применяют *энергию движения*. Под энергией движения понимают изменения яркости пикселей в соседних кадрах видеопоследовательности (производная яркостного сигнала по времени)

$$\frac{dL(x, y, t)}{dt} \approx \frac{L(x, y, t) - L(x, y, t - \Delta t)}{\Delta t},$$

где $L(x, y, t)$ — яркость пикселя с координатами (x, y) в момент времени t .

Скалярная оценка в виде энергии движения не обеспечивает различение объектов, находящихся в непосредственной близости друг к другу и движущихся с различными скоростями. Более инфор-

мативно поле векторов движения (*оптический поток*). После проецирования на плоскость кадра реальное трехмерное движение объектов отображается двумерным движением, которое может быть оценено мгновенными скоростями или дискретными смещениями фрагментов изображения — полем векторов движения.

Методами на основе признака движения невозможно выделить стационарные объекты. Определенные трудности вызывает сегментация очень медленно движущихся объектов (видимая скорость движения менее одного пикселя).

Одновременное использование поля векторов движения, а также признаков пространственной связности и детальности позволяет сегментировать несколько объектов, в том числе неподвижных, на неоднородном (сложном) фоне.

На основании первоначальной сегментации формируют модели объектов интереса, для которых определяют наилучшее соответствие в последующих кадрах. В *корреляционно-экстремальных* системах используют модели объектов различной степени сложности (подробности) в зависимости от априорной информации об объектах. При известном алфавите объектов возможно использование 3D-компьютерных моделей с последующей подготовкой бинарной маски или контурного препарата (рис. 1). При неизвестном алфавите модели строят на основе анализа сегментированной области изображения. Автоматическое построение модели эффективно реализуют на гладком фоне. На сложном фоне необходимо участие оператора,



■ Рис. 1. 3D-модель летательного аппарата, построенная по сечениям, и бинарная маска

который формирует строб, охватывающий объект. В простейшем случае все изображение внутри строба рассматривают как модель объекта. Для локализации собственно объекта внутри окна получают контурный препарат с помощью операторов:

Собела

$$\begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \begin{bmatrix} -1 & 2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix};$$

$$\begin{bmatrix} -2 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 2 \end{bmatrix}$$

Превитта

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}; \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix};$$

Робертса

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}; \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix},$$

— позволяющих выделить, соответственно, вертикальные, горизонтальные и наклонные контуры.

Процедура наиболее успешна при отсутствии контуров на фрагментах фона, попавших в строб. Считают, что в корреляционных системах основными проблемами являются потери объекта интереса на сложном фоне в условиях динамики свойств объекта, а также в момент перекрытия объекта интереса другими объектами или фрагментами фона.

Объединение признаков детальности и формы с признаком движения на этапе сопровождения позволяет реализовать *слоевое представление*: каждому объекту и фону сопоставляют свой слой

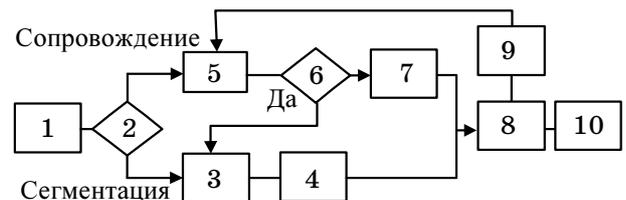
[1, 2]. Это обеспечивает автоматическое сопровождение объектов на сложном фоне, разрешение ситуаций окклюзии, слияния и разделения объектов.

Сегментация и сопровождение объектов на основе их слоевого представления

Основными процедурами предложенного метода являются:

- предварительный анализ изображения на основе признака детальности [3];
- сегментация объектов интереса на основе признаков пространственной связности и движения;
- сопровождение объектов на основе признаков движения, связности и формы (признаки учитывают с адаптивным весом).

Взаимодействие перечисленных процедур иллюстрирует рис. 2, где: 1 — предварительная классификация изображения на основе признака детальности; 2 — вид режима: первичная сегментация/сопровождение; 3 — сегментация объектов на основе пространственной связности и движения; 4 — формирование моделей формы и движения сегментированных объектов; 5 — сопровождение объектов на основе признаков движения и формы, учитываемых с адаптивными весами; 6 — проверка: есть блоки, не отнесенные к ранее сегментированным объектам интереса; 7 — обновление моделей формы и движения с учетом предсказания; 8 — анализ свойств объекта и окружающей обстановки; 9 — адаптация весов признаков; 10 — представление полученной информации об объектах и выработка управляющих сигналов.



■ Рис. 2. Обобщенная структура сегментации и сопровождения объектов на основе их слоевого представления

Модель формы объекта строят на основе предположения: вероятность принадлежности пикселя к изображению объекта тем выше, чем ближе он находится к центру тяжести последнего. Это приводит к гауссовой модели формы объекта в виде эллипсов рассеивания

$$L_g(\xi) = \exp\left[-(\xi - \mu_g)^T K_g^{-1}(\xi - \mu_g) / 2\right],$$

где $\xi = (x, y)^T$ — вектор координат элемента в плоскости изображения; μ_g — вектор координат центра тяжести изображения объекта с номером g ; матрица ковариаций

$$K_g = R^T(-\varphi_g) \text{diag}[a_g^2, b_g^2] R(-\varphi_g),$$

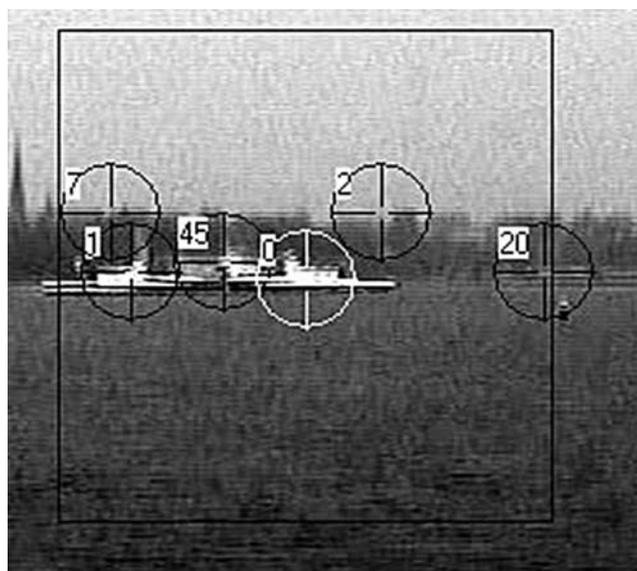
где a_g, b_g — длины полуосей; $R(-\varphi_g)$ — матрица поворота на угол $-\varphi_g$.

Сопровождение объектов реализуют путем определения степени соответствия вектора признаков фрагмента изображения (блока) к вектору признаков объекта g с помощью математического аппарата теории нечетких множеств [4].

Метод слоевого представления обеспечивает:

- Автоматический захват и одновременное сопровождение до 50 объектов, в том числе на сложном фоне. В видеокадре тестового сюжета (рис. 3) автоматически определены и ведутся цель с меткой «0» — корабль,двигающийся справа налево; цель с меткой «1» — корабль,двигающийся слева направо; цель с меткой «45» — неподвижный корабль у пристани; цели с метками «2», «7», «20» — фрагменты фона.

- Устойчивое разрешение ситуации окклюзии, слияния и разделения объектов при сопровождении.



■ Рис. 3. Сопровождаемые объекты в кадре тестовой последовательности

- Ошибку сегментации: для объектов размером до 5 блоков — 15–20 %, для объектов большого размера — 3–5 %.

- Среднеквадратическую ошибку (СКО) определения центра тяжести при сопровождении объектов — один пиксель.

Указанные характеристики получены для видеоданных при соотношении сигнал/шум порядка 30 дБ. При меньших соотношениях сигнал/шум использование поля векторов движения затруднено из-за влияния аномальных векторов — векторов, не отражающих реальное движение.

Априорная и апостериорная оценки достоверности векторов движения

Основным для определения векторов движения является уравнение оптического потока, полученное на допущении о постоянстве яркости $L(x, y, t)$ точки (пикселя) при ее движении [5]:

$$\nabla L \cdot \mathbf{v}^T + \frac{dL}{dt} = 0,$$

где $\nabla L = \left(\frac{\partial L}{\partial x}, \frac{\partial L}{\partial y}\right)$ — яркостной вектор-градиент по пространственным координатам; $\mathbf{v} = \left(\frac{\partial x}{\partial t}, \frac{\partial y}{\partial t}\right)$ — вектор оптического потока (вектор движения).

Анализ уравнения оптического потока показывает:

1. Уравнение недоопределено: неизвестных два, а уравнение одно.

2. Однозначное определение оптического потока возможно только в случае, если компоненты

яркостного вектора градиента $\nabla L = \left(\frac{\partial L}{\partial x}, \frac{\partial L}{\partial y}\right)$ от-

личны от нуля: имеют место изменения яркости по горизонтали и вертикали. Следовательно, в случае однородной поверхности без деталей или текстуры только в одном направлении достоверную оценку векторов движения потока найти нельзя.

3. Изменения уровня освещенности, тени, блики, прозрачные и зеркальные поверхности нарушают условие постоянства яркости перемещающейся точки, что затрудняет вычисления и приводит к ошибкам при определении векторов движения.

Чтобы снизить влияние аномальных векторов, предложено дополнить двумерные векторы движения третьим компонентом — оценкой его досто-

верности $p_{kl}^a: (v_{kl}^x, v_{kl}^y, p_{kl}^a)^T$, где v_{kl}^x, v_{kl}^y — составляющие по направлениям x и y вектора движения для блока с номерами k — по горизонтали и l — по вертикали.

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволили предложить функцию априорной достоверности вектора движе-

ния, определяющую вероятность корректного нахождения вектора движения (достоверность) в зависимости от свойств изображения в блоке:

$$P_{c_v}(k, l) = 1 - \exp[-\eta D_M^2(k, l)],$$

где $\eta = 3$ — параметр модели, численное значение которого найдено на основе экспериментальных данных; модифицированная оценка уровня детальности в блоке (k, l)

$$D_M(k, l) = \frac{D(k, l)}{D_0}, \quad D(k, l) = \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M \Delta L(x_k + j, y_l + i),$$

где ΔL — значение яркости пикселя в контурном препарате исходного изображения; (x_k, y_l) — координаты левого верхнего угла блока; N, M — число пикселей в блоке по горизонтали и вертикали соответственно. Наиболее вероятный уровень детальности в блоке

$$D_0 = \text{moda}\{D(k, l)\}, \quad k = 1, \dots, KK, \quad l = 1, \dots, LL,$$

где KK и LL — число блоков в изображении (рис. 4).

Введенная функция позволяет оставить для дальнейшей обработки блоки изображения с векторами движения, имеющими заданный уровень априорной достоверности. Это существенно снижает влияние аномальных векторов и вычислительную сложность задачи: векторы движения для блоков с низким уровнем достоверности не определяют. Например, уровень достоверности 0,95 исключает из дальнейшей обработки до 90 % блоков (рис. 5) [6].

Следует отметить, что для обеспечения высокого уровня достоверности поля векторов движения (0,95–0,98) необходимо исключить блоки, у которых $D_M(k, l) \leq 3$. При низких отношениях сигнал/шум, а также при высоком уровне детальности фона это может привести к резкому снижению числа блоков, разрешенных для сегментации. Недостаточное число блоков приводит к неполной сегментации объектов.

Для оценки качества сегментации введем показатель — степень сегментации объекта, под которой будем понимать отношение числа пришед-

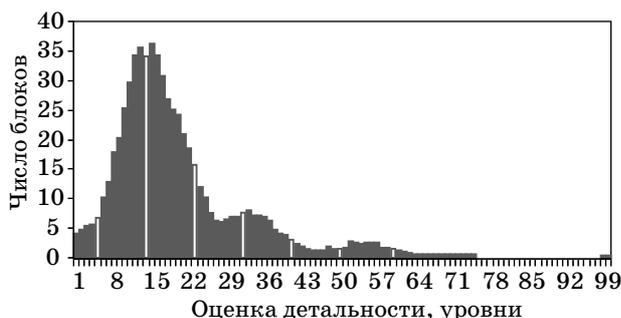


Рис. 4. Гистограмма распределения оценок детальности в блоках

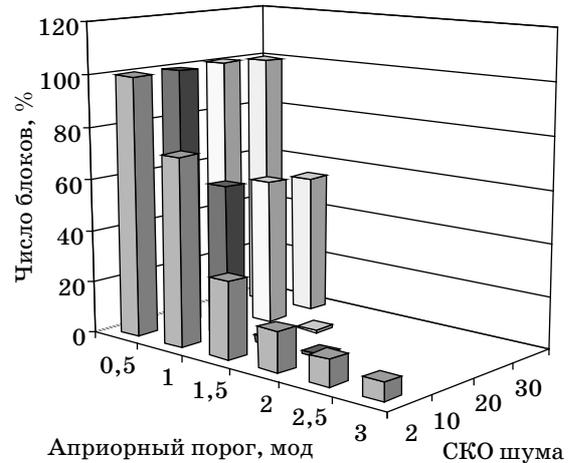


Рис. 5. Гистограмма числа блоков, подлежащих дальнейшей обработке в зависимости от отношения сигнал/шум и уровня порога

шихся на объект блоков, оставленных для дальнейшего анализа, Q_c , к эталонной блочной аппроксимации, Q_s :

$$K_c = \frac{Q_c}{Q_s}.$$

На рис. 6, а, б приведены графики зависимости степени сегментации объекта от величины порога, а также зависимость от величины порога вероятности ложной тревоги (ЛТ). Вероятность ЛТ

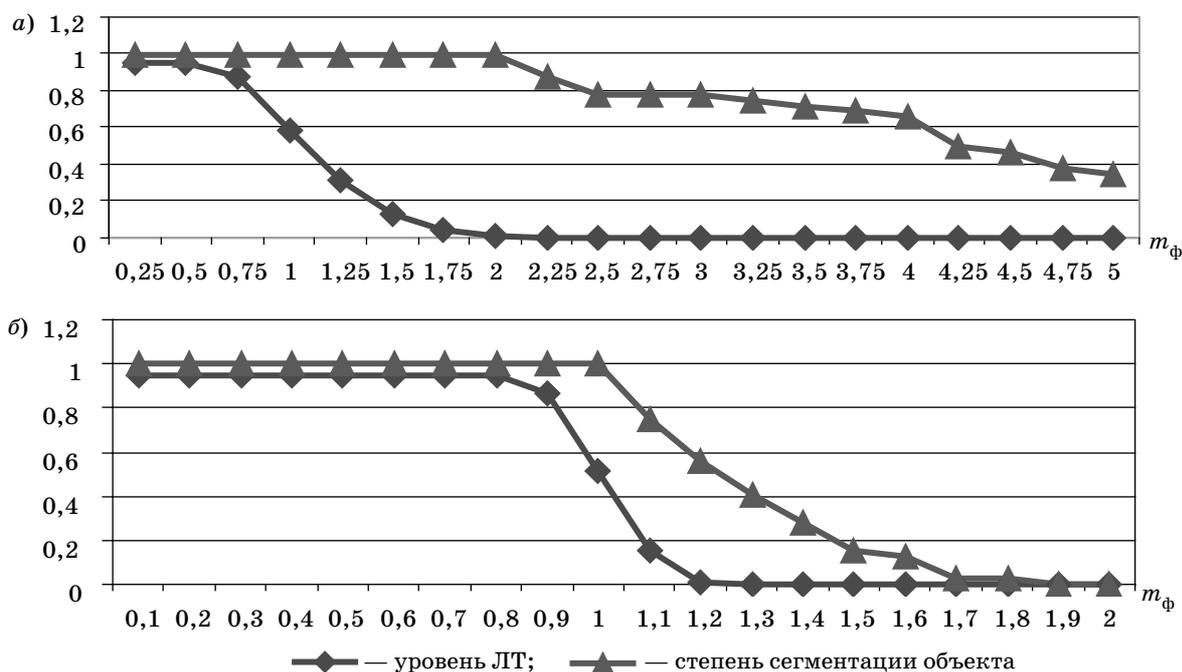
$$P_{ЛТ} = \frac{Q_{л}}{Q},$$

где $Q_{л}$ — число блоков, оставленных для дальнейшей обработки, но не принадлежащих объектам интереса; Q — число блоков в зоне поиска.

Результаты экспериментальных исследований позволяют сделать вывод: для тестовых последовательностей, мода оценок детальности фона m_{ϕ} которых не превышает $(10 \div 20)$ уровней квантования, может быть рекомендован порог $(2 \div 3) m_{\phi}$. Этот порог обеспечивает близкую к единице степень сегментации объекта и вероятность ЛТ $3,2 \cdot 10^{-3}$ (см. рис. 6).

Следует отметить, что приведенный уровень ЛТ является характеристикой первого этапа предварительной классификации. Он определяет не число ложных целей, а число оставленных для дальнейшего анализа блоков. Например, в проведенных экспериментах указанный уровень означает, что для зоны поиска 200×200 элементов с 625 блоками размером 8×8 число блоков, не принадлежащих объектам интереса, но оставленных для дальнейшей обработки, равно 2–3.

В видеосюжетах с детализированным фоном или при низком соотношении сигнал/шум использование порога в $2-3 m_{\phi}$ резко снижает степень сегментации объекта ($K_c \ll 1$). В этом случае для

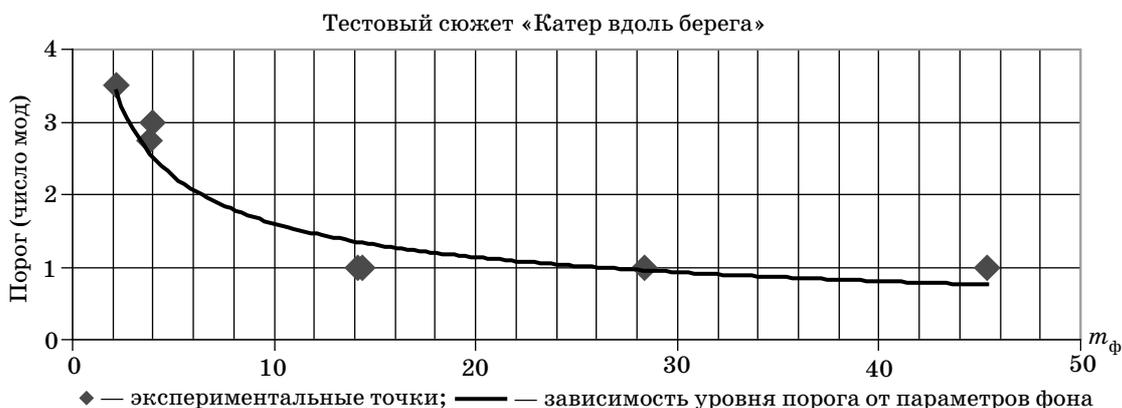


■ Рис. 6. Зависимости степени сегментации объекта интереса и ЛТ от априорного порога для тестового сюжета «Катер вдоль берега» при отношении сигнал/шум: а — 35 дБ; б — 22 дБ

повышения степени сегментации объекта интереса порог должен быть существенно снижен. Анализ видеосюжетов с различными уровнями детальности фона, а также с различными соотношениями сигнал/шум позволяет построить зависимость значения порога, обеспечивающего степень сегментации объекта интереса, близкую к единице, от характеристики фона. В качестве характеристики фона принята мода m_ϕ распределения оценок детальности $D(k, l)$ (см. рис. 4). Особенность введенной оценки детальности, рассчитываемой как сумма яркостных перепадов после пространственного дифференцирования или операции подчеркивания контуров, состоит в одновременном учете как детальности фона, так и шумовых составляющих, поскольку яркостные перепады в изображении обусловлены обоими факторами.

Найденная зависимость оптимального уровня порога от m_ϕ (рис. 7) показывает, что при низких значениях m_ϕ оптимальным является порог 2–3 моды, при высоких — одна мода. В первом случае поле векторов движения имеет уровень достоверности 0,98. Во втором случае достоверность поля векторов движения существенно ниже; вероятность ЛТ этапа предварительной классификации составляет 0,489: для дальнейшей обработки должно быть оставлено более 300 блоков (см. рис. 4).

Исправляют положение предварительной обработкой исходных изображений, а также дальнейшей пространственной и временной фильтрацией поля векторов движения. Пространственную фильтрацию реализуют за счет вычисления векторной медианы внутри скользящего прямоугольного окна. Временную — на основе многомасштаб-



■ Рис. 7. Зависимость оптимального значения априорного порога от уровня детальности фона

ной межкадровой разности, а также построением совокупности треков на этапе захвата и сопровождения (многотрековое сопровождение).

Пространственная медианная фильтрация поля векторов движения позволяет повысить степень сегментации протяженных объектов интереса за счет устранения аномальных векторов движения и вызванных ими «дырок» внутри сегментированного объекта. Однако объекты, меньшие по размерам маски медианного фильтра, могут быть потеряны.

Использование многомасштабной межкадровой разности предполагает определение векторов движения в последовательности из N кадров. Векторы движения находят для $(N - 1)$ пары кадров: k -я пара включает в себя кадр t и кадр $t - k$, $k = 1, \dots, N - 1$. Результатом является $(N - 1)$ значений векторов движения \mathbf{V}_k^0 , $k = 1, \dots, N - 1$. Для приведения значений векторов движения к кадровому интервалу принимают

$$V_{kx} = \frac{V_{kx}^0}{d}; V_{ky} = \frac{V_{ky}^0}{d},$$

где (V_{kx}, V_{ky}) — k -й приведенный вектор пакета; (V_{kx}^0, V_{ky}^0) — вектор, найденный методом совмещения блоков по кадрам t и $t - k$; d — интервал между кадрами t и $t - k$.

В кадре могут присутствовать объекты с различными скоростями движения. Полученная на основе пакета совокупность значений векторов движения включает три типа оценок. Первый тип \mathbf{V}_1 — нулевые значения, полученные по близко расположенным кадрам пакета при медленном движении (расстояние между кадрами недостаточно для получения значимого вектора). Второй тип \mathbf{V}_2 — значимые корректные значения векторов движения. Третий тип \mathbf{V}_3 — аномальные оценки.

В найденной для каждого блока совокупности векторов движения формируют кластеры по признаку близости векторов. Для дальнейшего анализа выбирают кластер с максимальной мощностью. Окончательную оценку вектора движения получают как среднее значение векторов, образовавших кластер с максимальной мощностью. Следует отметить, что полученная оценка будет иметь субпиксельный характер [7].

Примем за исходное предположение: чем больше мощность кластера, тем более высока достоверность найденного вектора движения. Введенное предположение позволяет получить оценку апостериорной достоверности найденного вектора движения p_{kl}^{ap} :

$$p_{kl}^{ap} = 1 - \exp\left(-\eta \left(\frac{C_{\max}}{N-1}\right)^2\right),$$

где η — параметр; C_{\max} — число векторов, вошедших в кластер с наибольшей мощностью.

Показатель	Сюжет «Катер на фоне берега», при соотношении сигнал-шум, дБ			
	35	28	22	18
Априорный порог, мод	3	1,25	1	1
Вероятность ложной тревоги	0,04	0,3	0,55	0,55
Апостериорный порог, m_p	0,11	0,37	0,37	0,37
Вероятность ложной тревоги после фильтрации	0,018	0,025	0,025	0,02
Степень сегментации объекта	0,82	0,357	0,13	0,07

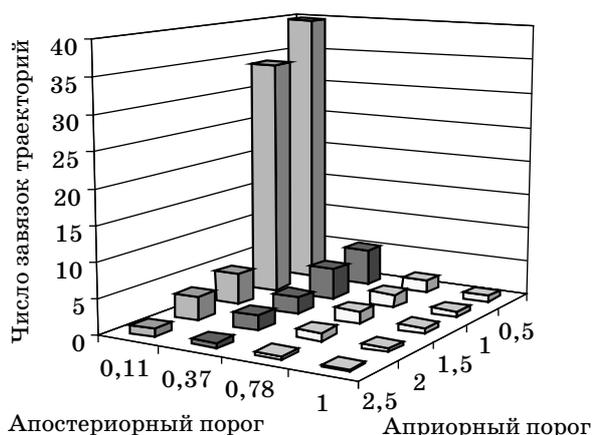
Введение апостериорной оценки достоверности векторов движения обеспечивает фильтрацию полученного поля векторов в целях уменьшения числа блоков, оставленных для дальнейшего анализа. Фильтрацию выполняют путем исключения векторов, у которых мощность максимального кластера, сформированного в пакете, ниже заданного порога. Например, если пакет включает n векторов, то для дальнейшего анализа следует оставить те блоки, которые вошли в кластер с наибольшей мощностью m , при условии, что величина m больше заданного порога m_p .

На основании экспериментальных данных, показывающих зависимость числа блоков, оставленных для вторичной обработки, а также степень сегментации объекта интереса при различных значениях априорного и апостериорного порогов, можно рекомендовать оптимальное значение апостериорного порога 0,11–0,37, что соответствует мощности кластера $m = (2 - 3)$. В этом случае вероятность ЛТ снижается в 2 раза при среднем значении степени сегментации объекта около 0,7 (таблица).

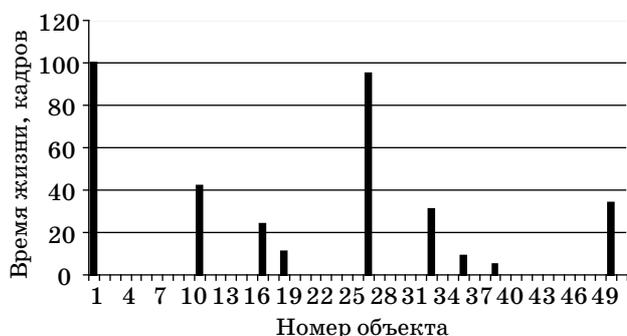
Анализ траекторий

Оставшиеся после фильтрации по априорному и апостериорному порогам блоки являются результатом этапа предварительной классификации. Далее реализуют сегментацию объектов интереса, объединяя блоки в кластеры. В результате получают кластеры двух типов: соответствующие объектам интереса и ложным объектам, обусловленным шумом и флюктуирующими деталями фона. Число ложных объектов тем выше, чем больше блоков разрешено для кластеризации (рис. 8). Для всех сегментированных объектов формируют модели движения и формы, на основании которых предсказывают положения объектов в следующем кадре. На этапе сопровождения блоки в последующих кадрах применяют для подтверждения существования объектов, уточнения моделей их формы и движения. Блоки, не соотнесенные ни с одним из существующих объектов, используют для сегментации новых объектов. Объекты, не нашедшие подтверждения в ряде кадров, уничтожают.

Для дальнейшего снижения числа ложных объектов применяют траекторный анализ. По ряду измеренных положений объекта строят его траек-



■ Рис. 8. Зависимость числа обрабатываемых траекторий от априорного и апостериорного порогов при СКО шума 10



■ Рис. 9. Состояние системы сопровождения объектов в течение 100 кадров

торию в виде плоской кривой с использованием регрессионного анализа или фильтра Калмана. Следует признать ложными те объекты, время существования которых не превышает заданного отрезка времени, например 1–2 с. Диаграмма состояния системы сопровождения в течение отрезка наблюдения длительностью в 100 кадров телевизионной развертки (рис. 9) показывает, что только два объекта являются истинными, а остальные семь могут быть признаны ложными. Введение фильтрации объектов по их времени существования позволяет значительно снизить загрузку вычислителя.

Заключение

Слоевое представление обеспечивает автоматический захват и сопровождение одновременно нескольких объектов на неоднородном фоне. Размещение объектов в разных слоях сохраняет возможность сопровождения не перекрытых объектов в ситуации окклюзии. Это исключает срыв сопровождения в случае маневра объекта.

Эффективность определения векторов движения блоков изображения для слоевого представления заметно снижается при низких соотношениях сигнал/шум. Введение априорной и апостериорной оценок достоверности векторов движения, а также анализ траекторий позволяют обеспечить применение метода при низких соотношениях сигнал/шум с приемлемыми для практики степенью сегментации объектов интереса и числом обрабатываемых траекторий ложных объектов.

Литература

1. Darell T., Pentland A. Robust Estimation of Multi — Layered Motion Representation // Proc. IEEE Workshop Visual Motion. 1991. P. 173–178.
2. Tao Hai, Sawhney Harpreet S., Kumar Rakesh. Object Tracking with Bayesian Estimation of Dynamic Layer Representations // IEEE Transaction on pattern analysis and machine intelligence. January 2002. Vol. 24. N 1. P. 75–83.
3. Обухова Н. А. Предварительная классификация изображения в задачах сегментации объектов // Информационно-управляющие системы. 2007. № 2. С. 22–28.
4. Обухова Н. А., Тимофеев Б. С. Сегментация объектов в последовательности видеок кадров методами нечеткой логики // Информационно-управляющие системы. 2006. № 3. С. 12–18.
5. Beauchemin S. S., Barron J. L. The computation of optical flow // ACM Computing Surveys. 1995. Vol. 27. N. 3. P. 433–467.
6. Обухова Н. А. Априорная оценка векторов оптического потока (векторов движения) // Изв. вузов России. Сер. Радиоэлектроника. 2006. № 3. С. 30–36.
7. Обухова Н. А. Субпиксельная оценка векторов движения // Известия вузов России. Сер. Радиоэлектроника. 2007. № 1. С. 18–23.

УДК 629.735.083.06

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ ДОСТОВЕРНОСТИ ДАННЫХ В ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМАХ ПРИ ИНФОРМАЦИОННОМ РЕЗЕРВИРОВАНИИ

А. Аль-Аммори,

канд. техн. наук

Киевский национальный транспортный университет

Проводится исследование способов информационного резервирования как основного условия обеспечения достоверности данных, получаемых от разных источников информации, к которым относятся контролирующие датчики сигналов и измерители всевозможных физических величин. Рассматриваются основные виды информационного резервирования (параллельное, последовательное и комбинированное) для выбора более эффективных, отказоустойчивых и отказобезопасных структур информационно-управляющих систем самолетов нового поколения.

Ключевые слова — источник информации, достоверность информации, информационное резервирование, вероятность ложной тревоги, вероятность необнаружения.

Известно, что эффективность и безопасность процессов полета существенно зависят от достоверности информации, поступающей на вход управляемых вычислительных систем от различного рода измерителей (так называемых датчиков информации), которые контролируют состояние и ход выполнения процесса полета.

Применение микропроцессорной системы (МПС) для управления и контроля сложными производственными процессами полета позволяет обрабатывать информацию, поступающую одновременно от многих источников и датчиков в реальном масштабе времени, восстанавливать данные в аналоговой форме на выходе микропроцессора (МП), а также распределять их между различными потребителями (исполнительными устройствами). При этом МПС производит целый ряд важных операций:

- обеспечивает циклический и адресный опрос датчиков;
- определяет истинные значения измеряемых величин по показаниям датчиков;
- распознает или обнаруживает события;
- производит цифровое управление и регулирование в сложных производственных системах и устройствах;
- обеспечивает адаптивное оптимальное управление с использованием обратной связи;
- производит статистическую обработку информации.

Для эффективного и качественного управления производственным процессом полета необходима достоверная информация, которую зачастую бывает очень сложно получить вследствие помех и некачественных источников информации, неточных измерителей контролируемых параметров, ненадежных датчиков и т. п.

В соответствии с физическим представлением работы реального датчика информационно-управляющие системы сигнализации могут находиться в одном из трех случайных несовместных состояний [1, 2]: a — вероятность верного сообщения; b — вероятность ложного сообщения; d — вероятность пропуска сообщения.

Такая система вероятностных состояний достаточно полно описывается триномиальным распределением [3, 4], которое является расширением биномиального распределения.

Вероятность того, что из n источников информации k из них пропускают сообщения, $m - k$ ложно сообщают и $n - m$ передают верное сообщение, описывается триномиальным распределением [3, 4]:

$$P_{(n-m, m-k, k)} = C_n^{n-m} a^{n-m} C_m^{m-k} b^{m-k} d^k, \quad (1)$$

где C_n^{n-m} — число сочетаний из n по $n - m$, причем:

$$a + b + d = 1. \quad (2)$$

Вероятностные характеристики a_n, b_n, d_n для n параллельно подключенных источников информа-

ции можно определить из триномиального распределения в соответствии с работами [3–6]:

$$\left. \begin{aligned} a_{n,1} &= 1 - (1 - a)^n; \\ b_{n,1} &= (1 - a)^n - d^n; \\ d_{n,1} &= d^n. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Если один и тот же источник информации запрашивать периодически с определенным интервалом времени и запоминать выдаваемую им информацию, то, согласно теореме Бейеса [3, 4], при заданной априорной вероятности α и заданных вероятностных характеристиках источников информации, а именно, вероятности a достоверного сообщения, вероятности b ложной тревоги и вероятности d необнаружения, апостериорные вероятности: P_{16} — достоверного сообщения, P_{26} — необнаружения контролируемого явления и P_{36} — ложной тревоги — можно определить с помощью следующих формул:

$$\left. \begin{aligned} P_{16} &= \frac{\alpha a}{\alpha a + (1 - \alpha)b}; \\ P_{26} &= \frac{\alpha d}{(1 - \alpha)a + \alpha d}; \\ P_{36} &= \frac{(1 - \alpha)b}{\alpha a + (1 - \alpha)b}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Если ввести обозначение $\beta = \frac{1 - \alpha}{\alpha}$ — коэффициент априорности контролируемого явления, и полагая, что $b = d$, можно ввести коэффициент γ качества источника информации, а именно,

$\gamma = \frac{b}{a} = \frac{d}{a}$ и при k повторных последовательных запросах одного и того же источника информации априорные вероятности P_{16} , P_{26} и P_{36} определяются зависимостями:

$$\left. \begin{aligned} P_{16}(k) &= \frac{1}{1 + \beta\gamma^k}; \\ P_{26}(k) &= \frac{\beta\gamma^k}{1 + \beta\gamma^k}; \\ P_{36}(k) &= \frac{\gamma^k}{\beta + \gamma^k}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Для сравнительной оценки эффективности параллельного и последовательного информационного резервирования, заключающейся в снижении вероятностей P_{26} необнаружения и P_{36} ложной тре-

воги в зависимости от числа последовательных запросов k одного источника информации и числа n параллельного подключения источников информации, соответственно можно ввести коэффициенты M_{b6} , M_{d6} влияния очередного запроса на снижение вероятностей ложной тревоги и необнаружения при последовательном резервировании и аналогичные коэффициенты M_{bA} , M_{dA} при параллельном резервировании. Указанные коэффициенты несложно определить способом деления соответствующих выражений, определяющих вероятности ложной тревоги и необнаружения ($k - 1$ -го и k -го запросов при $(n - 1)$ -м и n -м подключении источников информации соответственно. В результате таких операций получают следующие формулы:

$$\left. \begin{aligned} Mb_6 &= \frac{1 + \beta\gamma^k}{\gamma(1 + \beta\gamma^{k-1})}; \\ Mb_A &= \frac{(1 - a)^{n-1} - d^{n-1}}{(1 - a)^n - d^n}; \\ Md_6 &= \frac{\beta + \gamma^k}{(\beta + \gamma^{k-1})\gamma}; \\ Md_A &= \frac{d^{n-1}}{d^n} = \frac{1}{d}. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

При высоком качестве источника информации, когда $\gamma \rightarrow 0$, и увеличении числа k последовательных запросов одного источника информации и числа n параллельно подключаемых источников информации приведены коэффициенты $\tilde{M}b_6$, $\tilde{M}b_A$, $\tilde{M}d_6$, $\tilde{M}d_A$, определяемые формулами (6). Они асимптотически сводятся к следующим простым зависимостям:

$$\left. \begin{aligned} \tilde{M}b_6 &= \lim_{k \rightarrow \infty} Mb_6 = \frac{1}{\gamma}; \\ \tilde{M}b_A &= \lim_{n \rightarrow \infty} Mb_A = \frac{1}{1 - a}; \\ \tilde{M}d_6 &= \lim_{k \rightarrow \infty} Md_6 = \frac{1}{\gamma}; \\ \tilde{M}d_A &= Mb_A = \frac{1}{d}. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

При реализации мажоритарного принципа, например $Q = 2$ (индекс мажоритарности, который показывает, сколько источников информации n голосует «за»), коэффициенты Mb_{A2} , Md_{A2} снижения вероятностей P_3 ложной тревоги и вероятности P_2 необнаружения параллельной системы, состоящей из $n - 1$ источников информации, при подключении еще одного источника информации можно определить с помощью следующих формул:

$$\left. \begin{aligned}
 Mb_{A2} &= \frac{P_3(2, n-1)}{P_3(2, n)} = \\
 &= \frac{(1-a)^{n-1} - d^{n-1} - (n-1)bd^{n-2}}{(1-a)^n - d^n - nbd^{n-1}}; \\
 Md_{A2} &= \frac{P_2(2, n-1)}{P_2(2, n)} = \\
 &= \frac{d^{n-1} + (n-1)bd^{n-2} + (n-1)ad^{n-2}}{d^n + nbd^{n-1} + nad^{n-1}}.
 \end{aligned} \right\} (8)$$

На основании формул (6)–(8) можно определить коэффициенты $F_{bA}, F_{dA}, F_{b\delta}, F_{d\delta}$ снижения вероятностей P_3 и P_2 ложной тревоги и необнаружения при параллельном и последовательном информационном резервировании для заданных значений k последовательных запросов и n параллельно подключаемых источников информации соответственно согласно следующим выражениям:

$$\left. \begin{aligned}
 F_{bA} &= \prod_{i=1}^n \frac{(1-a)^{i-1} - d^{i-1}}{(1-a)^i - d^i}; \\
 F_{dA} &= \frac{1}{d^n}; \\
 F_{b\delta} &= \prod_{i=1}^k \frac{1 + \beta\gamma^i}{(1 + \beta\gamma^{i-1})\gamma}; \\
 F_{d\delta} &= \prod_{i=1}^k \frac{\beta + \gamma^i}{(\beta + \gamma^{i-1})\gamma}.
 \end{aligned} \right\} (9)$$

Из изложенного выше можно сделать следующие выводы:

— способ параллельного резервирования информации существенно снижает вероятность необнаружения ситуации и мало влияет на снижение вероятности ложной тревоги. Применение принципов мажоритарной логики позволяет снижать вероятность ложной тревоги, но при этом необходимо увеличивать число параллельных каналов, что связано с экономическими ограничениями;

— способ последовательного резервирования позволяет существенно снизить вероятность ложной тревоги при «незначительных» экономических затратах, однако применение этого способа ограничивается временем старения информации и корреляционными связями случайных самоустраниющихся отказов техники. Способ последовательного информационного резервирования легко реализуется в МПС, которые в настоящее время находят широкое применение. Последовательное информационное резервирование эффективно при задании оптимальных критериев подтверждения достоверности сообщения, если пришло « k » сообщений из « m » возможных сообщений, а если взять « k » примерно равным половине « m », то вероятно-

сти ложной тревоги и необнаружения будут равны. Если « k » достаточно мало, то будет повышена вероятность ложной тревоги, а если « k » стремится к « m », то будет повышаться вероятность необнаружения;

— комбинированное применение параллельного и последовательного резервирования позволяет эффективно снижать как вероятность ложной тревоги, так и вероятность необнаружения при минимальных экономических затратах.

Согласно асимптотическим приближенным значениям коэффициентов $Mb_{\delta}, Mb_A, \tilde{M}d_{\delta}, \tilde{M}d_A$, определяемых формулами (7), выражения (9) можно записать следующими упрощенными зависимостями:

$$\left. \begin{aligned}
 \tilde{F}_{bA} &= \frac{1}{(1-a)^n}; \quad \tilde{F}_{dA} = \frac{1}{d^n}; \\
 \tilde{F}_{b\delta} &= \frac{1}{\gamma^k}; \quad \tilde{F}_{d\delta} = \frac{1}{\gamma^k}.
 \end{aligned} \right\} (10)$$

На основании выражений (10) можно найти оценку снизу для числа k последовательных запросов и числа n параллельных подключений, если заданы требования на $\tilde{F}_{bA}, \tilde{F}_{dA}, \tilde{F}_{b\delta}, \tilde{F}_{d\delta}$ по снижению вероятностей P_3 ложной тревоги и P_2 необнаружения при параллельном и последовательном резервировании соответственно. Указанные оценки можно найти согласно следующим формулам:

$$\left. \begin{aligned}
 n_{bA} &> -\frac{\ln F_{bA}}{\ln(1-a)}; \quad K_{b\delta} > -\frac{\ln F_{b\delta}}{\ln \gamma}; \\
 n_{dA} &> -\frac{\ln F_{dA}}{\ln d}; \quad K_{d\delta} > -\frac{\ln F_{d\delta}}{\ln \chi}.
 \end{aligned} \right\} (11)$$

На основании изложенного можно решить следующую практическую задачу.

Пусть будет так, что быстротечность контролируемого процесса позволяет применить только k последовательных запросов одного источника информации. При этом снижение $\tilde{F}_{b\delta}$ и $\tilde{F}_{d\delta}$ вероятностей ложной тревоги и необнаружения можно оценить согласно формуле (10). Пусть значения $\tilde{F}_{b\delta}$ и $\tilde{F}_{d\delta}$, полученные согласно (10), не устраивают заказчика, который требует понизить эти вероятности не менее чем в W и V раз соответственно. Тогда можно определить минимальное число n источников, подключаемых параллельно для обеспечения требований по W и V , согласно следующим выражениям [1, 5]:

$$\left. \begin{aligned}
 n_{bA} &> -\frac{\ln W - \ln F_{b\delta}}{\ln(1-a)}; \\
 n_{dA} &> -\frac{\ln V - \ln F_{d\delta}}{\ln d}.
 \end{aligned} \right\} (12)$$

Естественно, для удовлетворения требованиям заказчика надо выбрать большее число из n_{bA} и n_{dA} .

Матрицы, приведенные в табл. 1–4, характеризуют общие коэффициенты подавления $F_{bA}, F_{dA}, F_{b6}, F_{d6}$, рассчитанные по формулам (9). Причем число столбцов соответствует числу k последовательных запросов одного и того же источника, а число строк определяется числом n параллельно подключенных источников. В каждой клетке матрицы располагается коэффициент понижения, определяемый для числа последовательных запросов, соответствующего номеру столбца, и для числа параллельно подключенных источников,

■ Таблица 1. Коэффициенты понижения вероятностей ложной тревоги, определяемые при следующих исходных данных: $a = 0,9; \beta = 1; b = d = 0,05$

$\frac{k}{n}$	1	2	3	4	$\frac{k}{n}$	1	2	3	4
1	1	15,78	262,1	4369,3	1	–	1	2	3
2	8,7	105,73	1755	29274,3	2	–	2	3	4
3	57,42	906,1	15050	250885,4	3	1	2		5
4	534	8426,5	139965	2333208,2	4	2	3	5	6

■ Таблица 2. Коэффициенты понижения вероятностей необнаружения, определяемые при следующих исходных данных: $a = 0,9; \beta = 1; b = d = 0,05$

$\frac{k}{n}$	1	2	3	4	$\frac{k}{n}$	1	2	3	4
1	1	15,78	262,1	4369,3	–	–	1	2	3
2	20	315,6	5242,2	87388	1	–	2	3	4
3	400	6312	1048442	1747721,5	2	1	3	5	6
4	8000	126240	2096846,4	34954429,5	3	2	5	6	7

■ Таблица 3. Коэффициенты понижения вероятностей ложной тревоги, определяемые при следующих исходных данных: $a = 0,9; \beta = 9; b = d = 0,05$

$\frac{k}{n}$	1	2	3	4	$\frac{k}{n}$	1	2	3	4
1	1	11,17	190,7	3007,4	–	–	1	2	3
2	6,7	74,8	1210,9	20149,3	–	–	1	3	4
3	57,42	641,4	10377,6	172682,4	1	1	2	4	5
4	534	5964,8	96510,1	1605928,7	2	2	3	4	6

■ Таблица 4. Коэффициенты понижения вероятностей необнаружения, определяемые при следующих исходных данных: $a = 0,9; \beta = 9; b = d = 0,05$

$\frac{k}{n}$	1	2	3	4	$\frac{k}{n}$	1	2	3	4
1	1	16,56	276,1	4601,8	–	–	1	2	3
2	20	331,2	5521,1	92036,8	1	–	2	3	4
3	400	6624	110422,1	1840736	2	1	3	5	6
4	8000	132480	2208441,6	36814721,5	3	2	5	6	7

соответствующего номеру строки. В матрицах указанные коэффициенты представлены в виде конкретных чисел. Для лучшей наблюдаемости и облегчения анализа полученных оценок в матрицах, изображающих те же самые значения коэффициентов, последние приведены в виде десятичного порядка полученных значений.

Исходя из данных, представленных в табл. 1–4, можно сделать следующие выводы.

1. Комбинированная система последовательно-параллельного резервирования одновременно снижает вероятности необнаружения и ложной тревоги, но более эффективно подавляет вероятности необнаружения.

2. Значения априорных вероятностей слабо влияют на повышение достоверности информации с увеличением числа последовательных запросов.

3. Заданные коэффициенты понижения вероятностей ложной тревоги и необнаружения можно обеспечить двумя способами: либо увеличением числа последовательных запросов при заданном числе параллельно подключенных источников, либо увеличением числа параллельно подключенных источников при заданном числе последовательных запросов.

Вероятность полной группы событий [1, 5] при последовательно-параллельном резервировании определяется формулой

$$P_{16}(1 - P_{1A}) + P_{1A}(1 - P_{16}) + P_{1A}P_{16} + (1 - P_{1A})(1 - P_{16}) = 1, \quad (13)$$

где P_{1A}, P_{16} — вероятности верного сообщения только для параллельного и только для последовательного информационного резервирования соответственно.

На основании (13) системная вероятность P_{1c} верного сообщения при последовательно-параллельном информационном резервировании определяется формулой

$$P_{1c} = 1 - (1 - P_{1A})(1 - P_{16}), \quad (14)$$

где

$$P_{1A} = 1 - (1 - a)^n; P_{16} = \frac{1}{1 + \gamma^k}; \gamma = \frac{1 - a}{a}. \quad (15)$$

Если подставить формулы (15) в (14), то после несложных преобразований можно получить зависимость

$$P_{1c} = 1 - (1 - a)^n \frac{(1 - a)^k}{a^k + (1 - a)^k}. \quad (16)$$

Из выражения (16) после преобразований получим

$$(1 - a)^n = \frac{(1 - P_{1c})(a^k + (1 - a)^k)}{(1 - a)^k}. \quad (17)$$

После логарифмирования формулы (17) можно получить окончательную расчетную формулу определения зависимости $n(k)$ числа параллельных источников информации от k последовательных запросов:

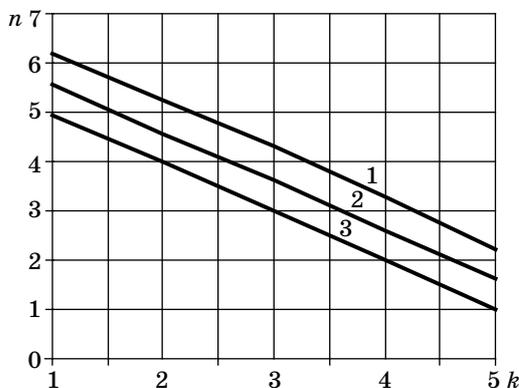
$$n(k) = \frac{\ln(1 - P_{1c}) + \ln(a^k + (1-a)^k) - k \ln(1-a)}{\ln(1-a)}. \quad (18)$$

Номограмма $n(k)$ (рис. 1, а) получена по формуле (18) при следующих исходных данных: $k = 1, 2, \dots, 5$; $a = 0,97$. Требуемая вероятность P_{1c} верного сообщения при совместном параллельно-последовательном информационном резервировании задана в трех вариантах.

Таким образом, в соответствии с исходными данными по номограмме можно графически определить требуемое число n параллельно подключенных источников информации при заданном k последовательном поступлении данных с одного источника информации и, наоборот, по заданному n можно графически определить необходимое число k для обеспечения требуемой вероятности P_{1c} системой источников информации с параллельно-последовательным резервированием информации. Для обеспечения требуемой величины P_{1c} с увеличением числа k последовательных данных число n параллельных источников информации можно уменьшить, а с увеличением n можно уменьшить k .

Достоверность информации отдельных источников информации, определяемая вероятностями, a, b, d , можно повысить, по крайней мере, двумя способами:

— посредством увеличения числа n источников информации; при этом будет увеличиваться вероятность P_{1n} правильного обнаружения контролируемого признака и, соответственно, снижаться вероятность P_{3n} и P_{2n} ложной тревоги и необнаружения контролируемого признака системой из n источников информации;



■ Рис. 1. Номограмма зависимости n от k при последовательно-параллельном информационном резервировании: 1 — $(1 - P_{1c}) = 10^{-7}$; 2 — $(1 - P_{1c}) = 10^{-8}$; 3 — $(1 - P_{1c}) = 10^{-9}$

— если один и тот же источник информации запрашивается k раз с определенным интервалом времени, то, очевидно, вероятность P_{1k} правильного обнаружения контролируемого признака после k -го запроса также будет повышаться, а вероятности P_{3k} (ложной тревоги) и P_{2k} (необнаружения) будут, соответственно, снижены.

Оба способа с помощью теоретико-алгебраических предположений можно объединить, представив совокупность n источников информации, каждый из которых запрашивается k раз, в виде матрицы D_{ij} :

$$D_{ij} = \begin{pmatrix} u_{11} & u_{12} & \dots & u_{1k} \\ u_{21} & u_{22} & \dots & u_{k1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ u_{n1} & u_{n2} & \dots & u_{nk} \end{pmatrix}. \quad (19)$$

В матрице число строк соответствует числу n источников информации, т. е. число строк определяется пространственным или параллельным резервированием. Число столбцов k определяет число последовательных запрашиваний одного и того же источника информации, т. е. число столбцов определяется временным или последовательно-параллельным информационным резервированием. Элемент матрицы D_{ij} представляет собой i -й источник информации, который последовательно запрашивается j раз.

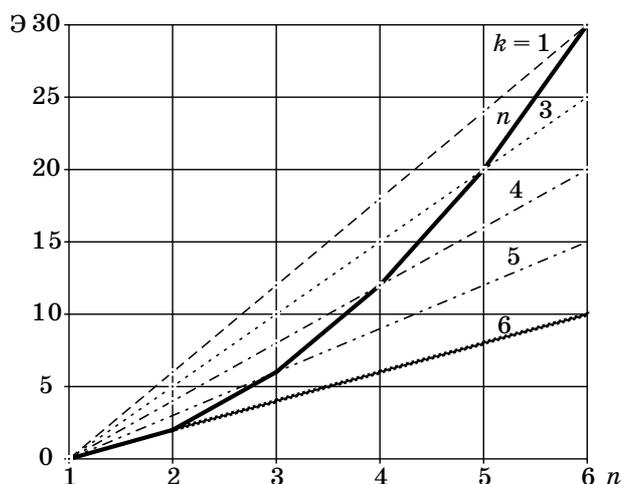
Применение некоррелированных k съёмов данных от одного и того же источника информации в информационной системе, состоящей из n источников информации, равносильно увеличению системы на число N_3 эквивалентных датчиков, определяемое формулой

$$N_3 = n(k-1). \quad (20)$$

Если при этом учесть стоимость (C) одного источника информации, то несложно оценить экономическую эффективность $\mathcal{E} = C \times n(k-1)$ последовательно-параллельного информационного резервирования (рис. 2).

Необходимо также учесть реальные ограничения на реализацию обоих способов повышения достоверности информации. Для первого способа ограничением является увеличение материальных затрат, связанных с увеличением числа n источников информации. Для второго способа ограничением является время старения информации, которое зависит от быстротекучести управляемых процессов, а также время корреляции между случайными сбоями или самоустраняющимися техническими отказами запрашиваемого источника информации, которое не должно превышать временной интервал между двумя съемами информации от одного и того же датчика информационной системы.

Можно полагать, что в конкретной ситуации существуют резервы как по n (параллельному ре-



■ Рис. 2. Экономическая эффективность при последовательно-параллельном резервировании

резервированию), так и по k (последовательному резервированию), которые позволяют существенно повысить достоверность информации.

В качестве примера нетрудно показать, что при использовании МПС управления параметров полета при $1 - a = 0,05$, $V = 1$ для информационной системы из четырех источников информации достоверность информации повышается в 10^3 раз. Если же в этой системе применять последовательный съем данных по четыре раза для каждого источника информации, то, согласно формуле (12), достоверность информации при этом повысится в 10^7 раз, т. е. на четыре порядка. При этом $N_3 = 12$, т. е. к четырем источникам информации как бы добавляется 12 эквивалентных источников информации. Это и есть неиспользованный резерв, который несложно реализовать на основе МПС.

Разумеется, приведенные выкладки получены с учетом абстрактных идеализированных условий. Практические результаты, очевидно, будут несколько ниже. Тем не менее, на практике существуют конкретные МПС, например:

- в радиолокационных измерителях, позволяющих существенно повышать достоверность информации при обработке получаемых данных по критерию « k из m », согласно которому в реальном масштабе времени постоянно контролируется « k » благоприятных исходов из « m » производимых зондирований обозреваемого радиолокатором пространства;
- в системах автоматического управления полетом (САУП) при съеме и обработке информации с первичных датчиков. Введение МП-техники в САУП позволяет повышать достоверность получаемой информации в нормальных и опасных (факторных) режимах работы САУП, и, в конечном

итоге, достигается повышение надежности и эффективности авионики для обеспечения высокого уровня безопасности процессов полета.

Выводы

В работе изложены основные способы повышения достоверности информации в информационно-управляющих системах методами параллельного, последовательного и комбинированного информационного резервирования.

- Способ параллельного резервирования информации существенно снижает вероятность обнаружения ситуации и мало влияет на снижение вероятности ложной тревоги. Применение принципов мажоритарной логики позволяет снижать вероятность ложной тревоги, но при этом необходимо увеличивать число параллельных каналов, что связано с экономическими ограничениями.
- Способ последовательного резервирования позволяет существенно снизить вероятность ложной тревоги при «незначительных» экономических затратах, однако применение этого способа ограничивается временем старения информации и корреляционными связями случайных самоустраниющихся отказов техники.
- Комбинированное применение параллельного и последовательного резервирования позволяет эффективно снижать как вероятность ложной тревоги, так и вероятность обнаружения при минимальных экономических затратах.

Литература

1. Соченко П. С., Аль-Аммори О. М., Аль-Аммори А. Способы повышения достоверности информации в системах управления / НАН Украины, Ин-т кибернетики им. В. М. Глушкова. Киев, 1998. 30 с.
2. Соченко П. С., Аль-Аммори А. Н., Аль-Аммори О. М., Дагман Я. Способы повышения эффективности информационно-управляющих систем. Киев: Наук. світ, 1999. 30 с.
3. Абезгаус Т. Т., Тронь А. П. и др. Справочник по вероятностным расчетам. М.: Воениздат, 1989. 656 с.
4. Вентцель Е. С., Овчаров Л. А. Теория вероятности и ее инженерные приложения. М.: Наука, 1988. 480 с.
5. Аль-Аммори А. Вероятностный способ обеспечения эффективности информационных систем // Управління проектами, системний аналіз і логістика / НТУ. Киев, 2006. Вип. 3. С. 178–180.
6. Аль-Аммори А. Н. Исследование способов повышения надежности контроля пожарной ситуации на борту воздушного судна // Проблемы эксплуатации и надежности авиационной техники: Сб. науч. тр. / КМУГА. Киев, 1998. С. 128–131.

УДК 519.2:519.7

АЛГЕБРАИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ И ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПРИ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКЕ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ В УСЛОВИЯХ НЕПОЛНОЙ ОПРЕДЕЛЕННОСТИ (Часть 2)

А. Е. Городецкий,

доктор техн. наук, профессор

И. Л. Тарасова,

канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник

Институт проблем машиноведения РАН

Предлагается использовать логико-вероятностные модели для диагностики структурно-сложных систем. Показано, что тогда оптимизация стратегий и тактик поиска неисправностей может быть сведена к вычислению матриц систем алгебраических уравнений по модулю два с минимальным количеством единиц и упорядочиванию строк таких матриц по убыванию вероятностей решений. Рассматриваются проблемы аппроксимации логико-вероятностных изображений сложных систем, построения, верификации, классификации и редуцирования адекватных логико-вероятностных моделей, а также проблемы распознавания изображений неисправных систем с указанием причин неисправностей.

Ключевые слова — техническая диагностика, неполная определенность, логико-вероятностные модели, сложные системы, нечеткая задача принятия решения, обработка изображений, алгебраические методы.

(Окончание. Начало см. в № 5, 2008)

Процедуры отображения алгебры данных в логико-вероятностную алгебру изображений

При построении логико-вероятностной модели системы, т. е. при отображении $\Phi: A_d \rightarrow A_l$, необходимо исходные данные перевести в логическую форму алгебры по модулю 2. При этом входная информация преобразуется в логическую форму или набор логических переменных x_i , из которых создается фундаментальный вектор логической системы F типа (10).

Зная фундаментальный вектор F системы, можно вычислить любую логическую функцию

$$f_i = C_i F, \quad (11)$$

характеризующую ее поведение. Причем идентификационные строки C_i , состоящие из комбинации 0 и 1 и имеющие размерность вектора F (например: $C_i = / 0 0 0 1 1 0 \dots \dots 0 /$), будут характеризовать объекты и отношения системы или ее элементы и связи между ними. При этом оптимизация получаемой при таком отображении $\Phi: A_d \rightarrow A_l$ модели F^* системы будет состоять в поиске оптимального набора идентификационных строк.

При преобразовании исходных данных в логическую форму могут возникнуть следующие подзадачи [7].

Получение логических переменных x_i вектора F путем квантования входных величин и присвоения полученным квантам q_i имен логических переменных x_i , принимающих значения истина «1» или ложно «0». Например, если входная переменная — температура T — может изменяться в пределах от -20 до $+20$ °C, то, введя квант в 10 °C, можно весь диапазон изменения температуры разбить на четыре кванта $q_1 = [-20, -10]$, $q_2 = [-10, 0]$, $q_3 = [0, +10]$, $q_4 = [+10, +20]$ (рис. 1, а). Тогда кванту q_1 можно присвоить имя x_1 {очень холодно}, кванту $q_2 - x_2$ {холодно}, кванту $q_3 - x_3$ {прохладно} и кванту $q_4 - x_4$ {тепло}. Теперь, если, например, температура на входе $T = +5$ °C, то значения логических переменных будут следующими: $x_1 = 0$, $x_2 = 0$, $x_3 = 1$, $x_4 = 0$. Если кванты, образующие смежные логические переменные, например «холодно» и «прохладно», будут частично перекрываться («холодно» — $[-15, +5]$, а «прохладно» — $[-5, +15]$), (рис. 1, б), то этим квантам можно также поставить в соответствие логические переменные таких же наименований. При этом степень принадлежности входной величины x_i к тому

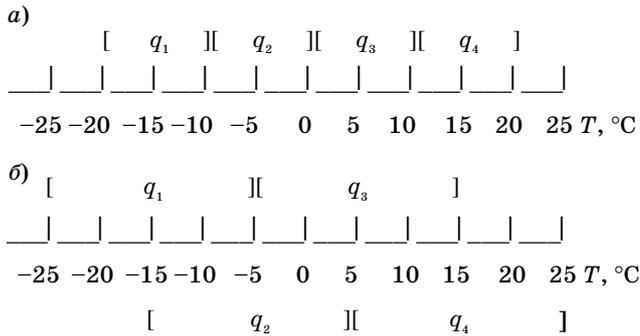


Рис. 1. Фазификация

или иному кванту (к той или иной логической переменной) будет характеризоваться вероятностью, вычисляемой как отношение перекрывающегося промежутка $Lq_i \cap q_j$ к протяженности кванта Lq_i (см. рис. 1, б):

$$P(x_i = 1) = Lq_i / Lq_i \cap q_j. \quad (12)$$

Полученные описанным способом переменные принято называть логико-вероятностными [3]. Тогда фундаментальный вектор F будет иметь значительную избыточность, которая может быть уменьшена, если часть логических функций f_i известна заранее и нет необходимости поиска соответствующих им идентификационных строк C_i .

Уменьшить избыточность F также можно, если известны функциональные зависимости между входными величинами.

Пусть, например, имеется функциональная зависимость входных величин $Y_2(Y_1)$, показанная на рис. 2. Для перевода линейной зависимости 1 в систему логических функций (уравнений) вначале надо, исходя из требуемой точности δ_i представления входных величин, разбить диапазоны их изменения $D_1 = Y_{1max} - Y_{1min}$ и $D_2 = Y_{2max} - Y_{2min}$ на N_1 и N_2 квантов:

$$q_{1i} = [Y_{1min} + i\delta_i, Y_{1min} + (i + 1)\delta_i], i = 0, 1, 2, \dots, N_1;$$

$$q_{2j} = [Y_{2min} + j\delta_j, Y_{2min} + (j + 1)\delta_j], j = 0, 1, 2, \dots, N_2.$$

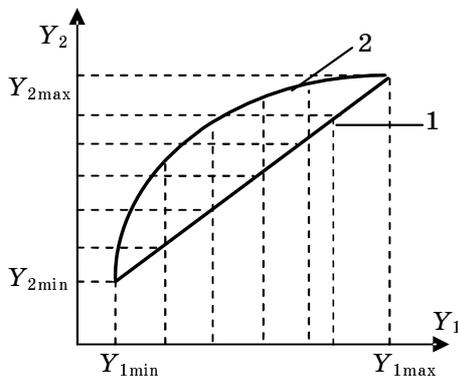


Рис. 2. Функциональные зависимости входных величин

Таблица 1

	X ₂₁	X ₂₂	X ₂₃	X ₂₄	X ₂₅	X ₂₆	X ₂₇	X ₂₈	X ₂₉
X ₁₁	1	0	0	0	0	0	0	0	0
X ₁₂	0	1	0	0	0	0	0	0	0
X ₁₃	0	0	1	0	0	0	0	0	0
X ₁₄	0	0	0	1	0	0	0	0	0
X ₁₅	0	0	0	0	1	0	0	0	0
X ₁₆	0	0	0	0	0	1	0	0	0
X ₁₇	0	0	0	0	0	0	1	0	0
X ₁₈	0	0	0	0	0	0	0	1	0
X ₁₉	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Затем в соответствии с рис. 2 можно составить табл. 1 для вывода логических функций умножения по модулю 2 или конъюнкции между логическими переменными X_{1i} и X_{2j} , которым соответствуют кванты q_{1i} и q_{2j} (рис. 3), либо — импликаций между X_{1i} и X_{2j} (рис. 4).

Выбор конкретной логической функции из представленного на рис. 3 и 4 набора, отражающей приведенную на рис. 2 линейную зависимость $Y_2(Y_1)$, определяется содержательной частью решаемой задачи. В большинстве случаев указанную зависимость можно представить в виде системы логических уравнений типа (17).

Очевидно, что все логические уравнения (13)–(17) могут быть переведены в стандартную форму (11).

В случае нелинейной зависимости $Y_2(Y_1)$ (см. рис. 2, кривая 2) нельзя каждому кванту q_{1i} поставить в соответствие один квант q_{2j} . При этом какому-либо кванту q_{1i} могут соответствовать: либо один полный квант q_{2j} , либо один неполный квант q_{2j} , либо два и более полных кванта q_{2j}, q_{2j+1} , либо один или несколько полных кванта q_{2j}, q_{2k} , либо один или несколько неполных кванта q_{2j-1}, q_{2k+1} и т. д. (табл. 2). При этом, если такие нелинейные зависимости (см. рис. 2) отображать, как и преж-

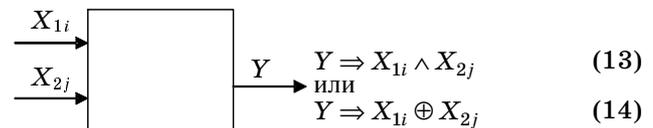


Рис. 3. Логическое умножение

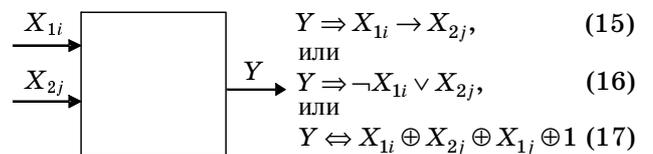


Рис. 4. Импликация

■ Таблица 2

	X_{21}	X_{22}	X_{23}	X_{24}	X_{25}	X_{26}	X_{27}	X_{28}	X_{29}
X_{11}	1/1	1/1	1/0,5	0	0	0	0	0	0
X_{12}	0	0	1/0,5	1/1	1/0,2	0	0	0	0
X_{13}	0	0	0	0	1/0,8	1/0,4	0	0	0
X_{14}	0	0	0	0	0	1/0,6	1/0,5	0	0
X_{15}	0	0	0	0	0	0	1/0,6	1/0,1	0
X_{16}	0	0	0	0	0	0	0	1/0,8	0
X_{17}	0	0	0	0	0	0	0	1/0,1	1/0,5
X_{18}	0	0	0	0	0	0	0	0	1/0,7
X_{19}	0	0	0	0	0	0	0	0	1/0,1

де, только системой логических уравнений, т. е. без учета степени принадлежности какого-либо кванта q_{2j} кванту q_{1i} , то будет вводиться большая погрешность отображения, зависящая от вида кривой 2. Улучшить эту ситуацию можно путем введения вероятностей $P\{X_{1i} \rightarrow X_{2j} = 1\}$, вычисляемых подобно вероятностям в уравнении (12) и приведенных в табл. 2 (в знаменателях), например: $P\{X_{12} \rightarrow X_{23} = 1\} = 0,5$.

Нами рассмотрена простейшая, монотонная гладкая возрастающая зависимость. Замена более сложных функциональных зависимостей на логические функции, очевидно, будет приводить к большим погрешностям, уменьшение которых потребует дополнительных усилий. Тем не менее, приведенные примеры показывают, что имеется принципиальная возможность построения вектора \mathbf{F} логико-вероятностной модели системы в целом, позволяющего получать решения многих практических задач с достаточной точностью при некотором увеличении их размерности и интерпретировать и объяснять получаемые результаты.

Редуцирование логико-вероятностных моделей

Полученные в результате аппроксимации исходных данных логико-вероятностные модели типа (5) сложных систем, как правило, получаются чрезвычайно большой размерности и плохо пригодны к реализации задач реального времени. Например, даже перевод простого алгебраического выражения $y = ax$ при шаге квантования $h = X_{\max}/100$, т. е. при точности отображения 1 %, приводит к 100 логическим уравнениям типа $x \rightarrow y$. Поэтому встает задача сжатия полученного после аппроксимации исходных данных изображения I^* или редуцирования моделей типа (5) таким образом, чтобы при замене идеального изображения I на редуцированное изображение I_r^* терялось незначительное количество информации.

Сократить размерность можно за счет подбора элементов разбиения (квантования) и тщательного выбора типа разбиения (квантования). Например, разбиение может быть с постоянным шагом h

либо с функционально изменяющимся $h(x, t)$ в зависимости от типа решаемой задачи и цели моделирования. Кроме того, редуцировать модели типа (5) можно введением минимально допустимой вероятности решения P_{\min} и отбрасыванием i -х строк, дающих решение y_i с вероятностью $P\{y_i = 1\} \leq P_{\min}$. Очевидно, что указанные процедуры редуцирования следует проводить очень осторожно при решении задач диагностики, так как даже маловероятные события могут приводить к серьезным, а иногда и к катастрофическим последствиям, связанным с выходом из строя сложной системы.

Распознавание изображений

Существенно ускорить процесс принятия решения при диагностике сложных систем можно за счет распознавания полученного изображения I_r^* , т. е. отнесения его к тому или иному классу образов C_j^I идеального изображения $I \in C_j^I$. В случае, если класс C_j^I , к которому мы отнесли рассматриваемое изображение I_r^* , хорошо изучен и для него получено оптимальное решение, тогда для модели I_r^* можно использовать метод ситуации привычности [8], т. е. искомое решение заменить аналогом.

Процедура распознавания изображений I_r^* в случае представления их в алгебре по модулю 2, т. е. в виде модели типа (5), требует задание правил или алгоритмов обработки лингвистической атрибутивной части, характеризующей логические переменные, при проведении над ними операций сложения и умножения по модулю 2.

Каждое решение $y_i(k)$ системы уравнений (5) будет иметь некоторый лингвистический атрибут, его характеризующий и образующий в общем случае неметризуемое множество B_i . При распознавании выбор наилучшего класса из множества альтернативных может опираться на процедуру поиска бинарных отношений $B_i g B_{c_j}$, где B_{c_j} — множество, характеризующее решение из рассматриваемого класса C_j^I , к которому мы хотим максимально приблизиться, а g — двуместный предикат на анализируемых множествах, который может быть задан, например, путем указания формул логико-математического языка или путем задания формализованного лингвистического выражения [3]. При этом проблема выявления наилучшего приближения сводится к двум задачам. Первой является задача получения множеств B_i, B_{c_j} , а второй — конструирование оптимальной процедуры g , позволяющей получить количественную оценку близости B_i к B_{c_j} .

Создание исходной базы для конструирования g целесообразно начинать с выделения в каждом из сравниваемых множеств метризуемых подмножеств (например, подмножества вероятностей решений), для элементов которых могут быть указаны отношения и числовые меры близости. Следующим, наиболее сложным шагом является упо-

рядочивание элементов неметризуемых подмножеств. Весьма вероятно, что для решения этой задачи понадобится построение новой системы логических уравнений, решение которой приведет либо к метризуемым множествам, либо к упорядоченным. В первом случае мы сразу получаем числовые меры близости. Во втором эти меры придется строить заново. В качестве возможных числовых оценок могут быть использованы мощности множеств, количество совпадающих элементов, число групп совпавших элементов и др. Каких-либо рекомендаций по выбору тех или иных оценок в настоящее время рекомендовать нельзя в связи со слабой изученностью подобных моделей. В случае невозможности упорядочивания неметризуемых множеств решение о наибольшей близости какого-либо множества к эталону должен принимать сам исследователь, исходя из своих предпочтений, опыта и интуиции.

Заключение

Использование алгебраического подхода для решения задач технической диагностики сложных систем позволит представлять их изображения, описывающие модели отказов, как линейные структуры и для анализа и синтеза их свойств использовать математический аппарат векторно-матричной алгебры.

Учитывая, что при диагностике сложной системы в условиях неполной определенности получение ее изображения или математической модели осуществляется в целях синтеза оптимального алгоритма поиска неисправностей в системе, последнюю целесообразно рассматривать как нечеткую, неопределенности в которой описываются вероятностями случайных логических переменных.

При моделировании сложных систем мы сталкиваемся с тем, что, чем сложнее система, тем менее мы способны дать точные и в то же время имеющие практическое значение суждения о ее поведении. Поэтому точный количественный анализ поведения сложных систем для практического исследования реальных задач, по-видимому, недостаточен. Задачи диагностики таких систем целесообразно решать с использованием методов логико-вероятностного математического моделирования, а вычисления вероятностей производить приближенно на ЭВМ с параллельной архитектурой вычислений, например на нейронных сетях.

Практически всегда имеется принципиальная возможность построения логико-вероятностной модели сложной системы в целом, позволяющей получать решения многих практических задач с достаточной точностью при некотором увеличении их размерности и интерпретировать и объяснять получаемые результаты. Однако при решении задач реального времени необходима редукция получаемых моделей за счет подбора шага квантования и отбрасывания решений с низкой вероятностью.

Кроме того, отнесение полученного изображения (модели) к одному из хорошо изученных классов позволяет значительно уменьшить время принятия решения за счет использования ситуации привычности, т. е. замещения искомого решения аналогом. При этом проблема выявления наилучшего приближения сводится к двум задачам: получения достаточного множества изображений и конструирования оптимального бинарного отношения, позволяющего получить количественную оценку близости сравниваемых изображений.

Литература

1. Grenander U. Pattern analysis // Lectures in Pattern Theory. N. Y.: Springer-Verlag; Berlin: Heidelberg. 1978. Vol. 11.
2. Городецкий А. Е., Дубаренко В. В., Ерофеев А. А. Принципы создания моделей для прогноза отказов в нечетких системах // Управление в условиях неопределенности / Под ред. А. Е. Городецкого. СПб.: СПбГТУ, 2002.
3. Городецкий А. Е., Тарасова И. Л. Управление и нейронные сети. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2005.
4. Zadeh L. A. Fuzzy sets // Inform. Contr. 1965. Vol. 8. P. 338–353.
5. Юдин Д. Б. Вычислительные методы теории принятия решений. М.: Наука, 1989.
6. Городецкий А. Е., Дубаренко В. В. Комбинаторный метод вычисления вероятности сложных логических функций // ЖВТ и МФ. 1999. Т. 39. № 7. С. 1246–1248.
7. Городецкий А. Е., Тарасова И. Л. Логически прозрачные сети // Информационно-управляющие системы. 2003. № 5. С. 18–20.
8. Городецкий А. Е. Об использовании ситуации привычности для ускоренного принятия решения в интеллектуальных информационно-измерительных системах // Физическая метрология: теоретические и прикладные аспекты. СПб.: Изд. KN, 1996. С. 141–151.

УДК 629.76.051

УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ В ОСОБЫХ РЕЖИМАХ

А. С. Коновалов,

доктор техн. наук, профессор

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Д. О. Якимовский,

начальник лаборатории

ФГУП «НИИ командных приборов»

Рассмотрены вопросы программного разгона ротора гироскопа с газодинамическими опорами и бесконтактным двигателем постоянного тока с постоянными магнитами. Исследовано влияние параметров программы на динамику движения ротора в условиях неустойчивости момента сопротивления в опорах.

Ключевые слова — управление, ротор гироскопа, бесконтактный двигатель, газодинамическая опора.

На космических аппаратах широко используются электроприводы различного назначения. Некоторые из них работают в специфических, особых для данного типа электропривода, режимах. Так, для построения прецизионных инерциальных систем применяют гироскопы с газодинамическими опорами (ГДО) [1, 2]. В качестве приводного двигателя предпочтительно использовать бесконтактный двигатель постоянного тока с постоянными магнитами (БДПТ). Управление коммутатором фаз двигателя осуществляется по сигналам ЭДС статора, которые возникают при вращении ротора. Преимущества такого привода, в сравнении с приводом на базе синхронного гистерезисного двигателя, — это высокая магнитная стабильность ротора, низкое тепловыделение в двигателе, возможность управления, вплоть до исключения, угловыми колебаниями ротора в установившемся режиме [3, 4]. Разгон ротора до величины ЭДС, достаточной для управления двигателем, должен происходить по специальной частотной программе. При этом магнитное поле ротора синхронно отслеживает равноускоренное вращение магнитного поля статора. Динамика программного движения ротора носит колебательный характер и зависит от моментных характеристик БДПТ, характера изменения момента сопротивления нагрузки (для гироскопа — опор ротора) и параметров программы разгона [5]. Особенность заключается в том, что привод работает в условиях жесткого ограничения мощности двигателя и существенной неустойчивости параметров газодинами-

ческой опоры. Ниже приведены результаты исследований режимов запуска миниатюрного гироскопа с ГДО.

При построении модели электропривода приняты следующие допущения:

— кривая синхронизирующего момента двигателя, возникающего при рассогласовании осей полюсов (векторов магнитных полей) ротора и статора на угол θ , симметрична относительно начала координат и аппроксимирована синусоидой;

— транзисторы электронного коммутатора фаз БДПТ — идеальные ключи;

— постоянные времени контура регулирования тока БДПТ пренебрежимо малы, переходные процессы в контуре не оказывают влияния на движение ротора.

Математическая модель движения ротора с учетом принятых допущений имеет вид

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{\max} \sin \theta - M_c(\omega),$$

$$\frac{d\varphi}{dt} = \omega, \quad \theta = \alpha - \varphi^*, \quad \alpha = F_\alpha(t), \quad \varphi^* = \varphi p,$$

где J — момент инерции ротора; ω — скорость вращения ротора; M_{\max} — момент двигателя; θ — угол рассогласования между магнитными полями ротора и статора; $M_c(\omega)$ — зависимость момента сопротивления в ГДО от скорости вращения ротора; φ — угол поворота ротора; α — угол поворота вектора магнитного поля статора; $F_\alpha(t)$ — функция,

описывающая изменение углового положения (вращения) вектора магнитного поля статора во времени; $\varphi^* = \varphi p$ — угол поворота вектора магнитного поля ротора, эл. град; p — число пар полюсов двигателя.

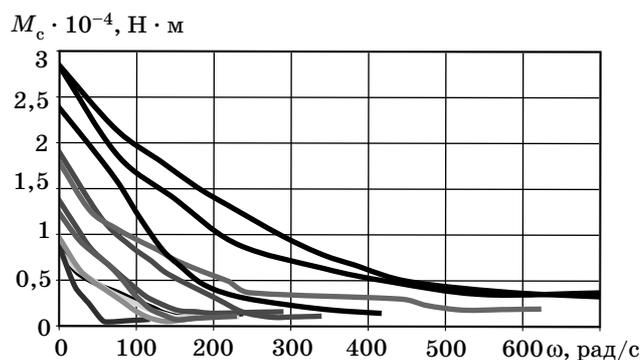
Зависимость момента сопротивления вращению в ГДО имеет сложный характер: содержит участок с отрицательной зависимостью момента от скорости, нестабильна во времени, зависит от состояния поверхностей сфер опор и т. д. [1, 2, 6]. Величина момента сопротивления от начала движения до «всплытия» ротора может изменяться на порядок. Значения момента сопротивления при нулевой скорости и скорость «всплытия» зависят от состояния поверхностей опор и в процессе эксплуатации могут меняться в несколько раз. Изменения могут произойти в одной из опор прибора. Положение в пространстве гироскопа при каждом запуске произвольное, ротор может опираться на любую из опор или на две сразу, поэтому условия каждого нового запуска могут существенно меняться. На рис. 1 показаны зависимости моментов сопротивления от скорости вращения ротора, полученные экспериментально при испытаниях контрольной партии приборов.

В модели зависимость момента сопротивления представлена в виде выражения

$$M_c = M_{c0} e^{-\tau|\omega|} \text{sign}(\omega) + k\omega,$$

где M_{c0} — момент сил сухого трения в ГДО; τ — параметр, характеризующий спадание момента сопротивления при всплытии ГДО; k — коэффициент вязкого трения в ГДО.

Функция $F_\alpha(t)$ задана из условия, что вектор магнитного поля статора дискретно равноускоренно вращается из некоторого нулевого положения. Начальная скорость вращения вектора равна нулю, конечная соответствует скорости переключения электропривода в режим управления БДПТ по ЭДС, в рассматриваемом случае $\omega = 200$ рад/с. Дискретное вращение означает, что вектор магнитного поля статора может поворачиваться на угол — шаг программы, равный (или кратный) некоторому минимальному значению α_{\min} . Для трехфазных машин просто реализуется $\alpha_{\min} = 30$ эл. град. Уравне-



■ Рис. 1. Зависимости момента сопротивления в ГДО

ние равноускоренного вращения вектора статора имеет вид

$$\alpha = \alpha_0 + \dot{\alpha}t + \frac{Kt^2}{2},$$

где K — скорость нарастания частоты вращения поля статора.

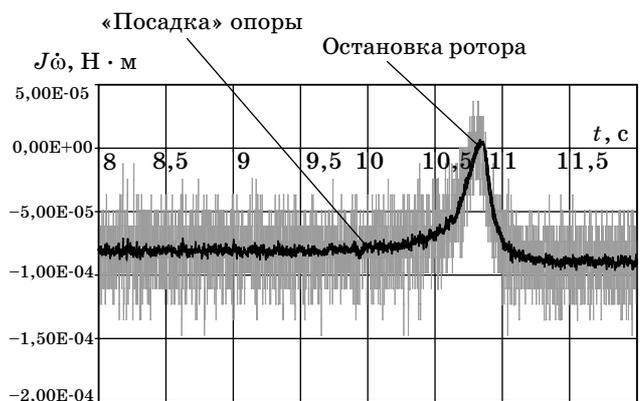
Поскольку вращение начинается при нулевых начальных условиях ($\alpha_0 = 0$ и $\dot{\alpha} = 0$), а угловое положение вектора может быть только кратным шагу, то время очередного шага t_N можно определить из выражения

$$t_N = \sqrt{\frac{2N\alpha_{\min}}{K}},$$

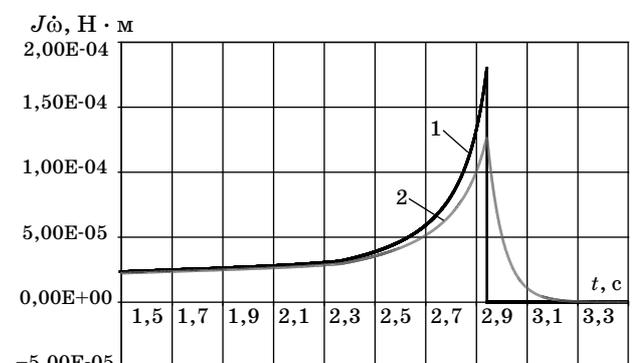
где N — порядковый номер очередного шага; α_{\min} — минимальный угол поворота, рад.

Результаты компьютерного моделирования движения ротора и соответствующие им экспериментальные данные представлены на рис. 2–5. Динамический момент ротора $M_{\text{дин}} = J\dot{\omega}$ измерялся с помощью измерителя динамического момента.

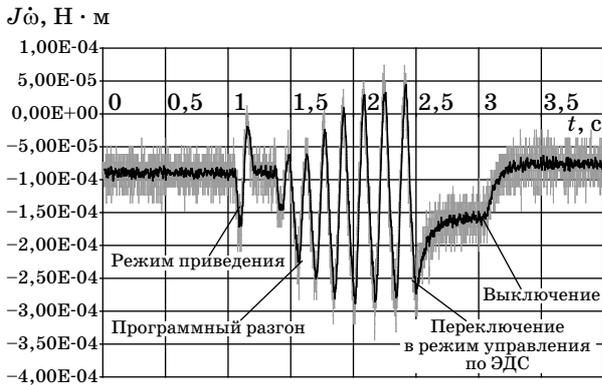
Результаты моделирования показали, что принятая модель в целом правильно отражает характер протекающих процессов.



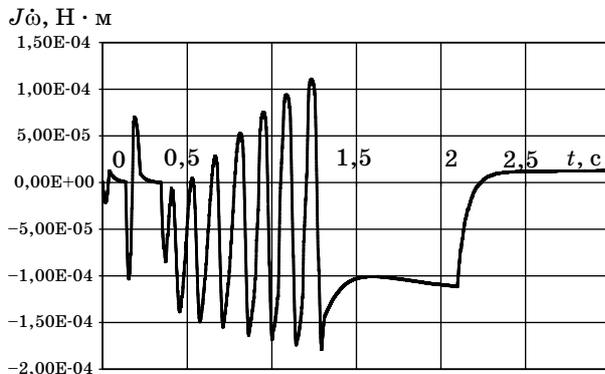
■ Рис. 2. Экспериментальная зависимость $M_c(\omega)$



■ Рис. 3. Зависимость $M_c(\omega)$, полученная при моделировании остановки ротора: 1 — изменение динамического момента $M_{\text{дин}}$; 2 — имитация показаний измерителя $M_{\text{дин}}$ с учетом его постоянной времени

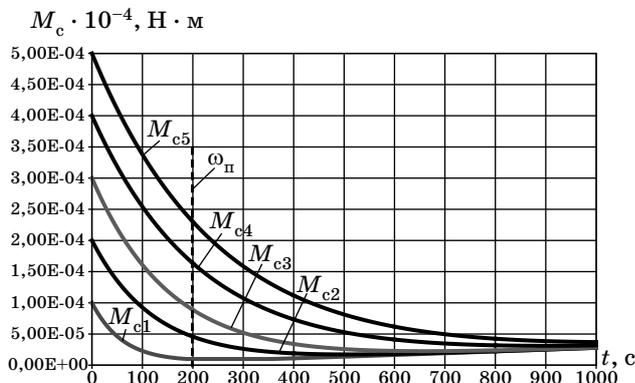


■ Рис. 4. Запись динамического момента



■ Рис. 5. Результат моделирования движения ротора

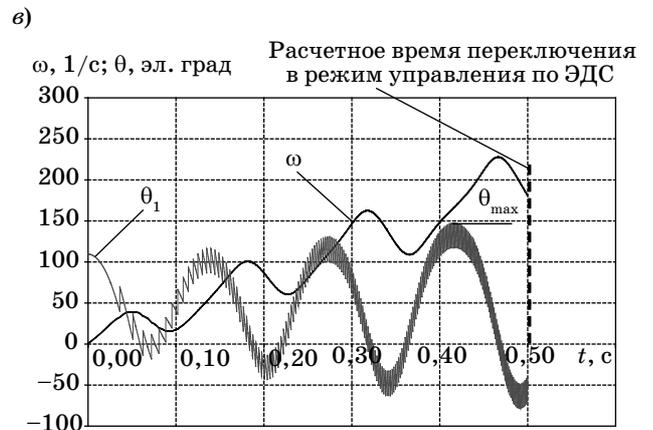
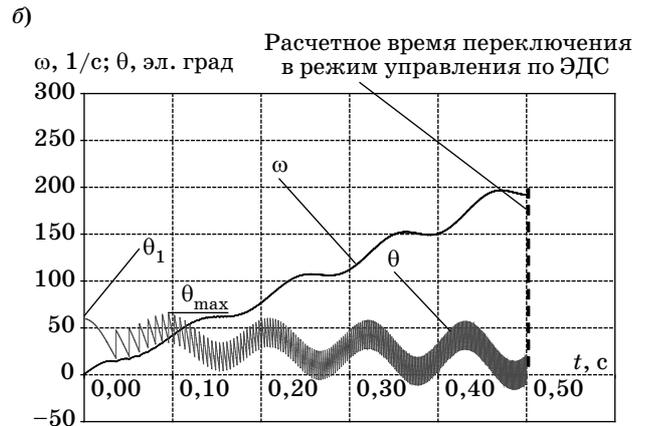
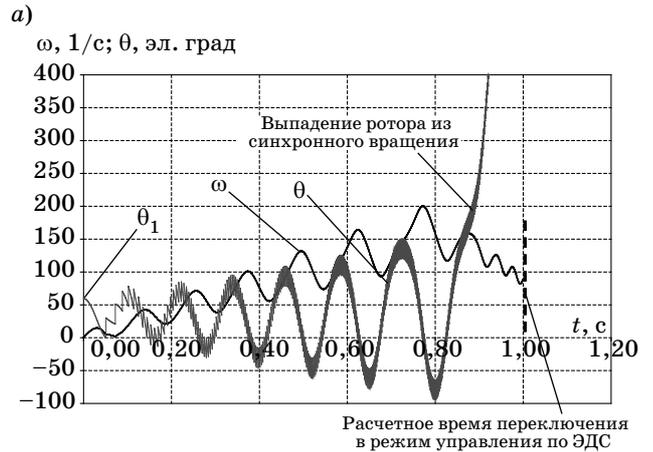
Из анализа работы системы и результатов моделирования можно утверждать, что динамика движения ротора по программе зависит от следующих параметров: максимального момента двигателя M_{\max} , момента сопротивления $M_c(\omega)$, величины углового шага программы α_{\min} , начального угла рассогласования полей θ_1 , скорости нарастания частоты поля статора K . Как отмечалось



■ Рис. 6. Предполагаемые зависимости $M_c(\omega)$: кривая M_{c1} соответствует исходному, а M_{c5} — предельному (худшему) состоянию ГДО; ω_n — скорость переключения в режим управления по ЭДС

выше, момент сопротивления в ГДО нестабильный, поэтому перед началом исследований необходимо определить предполагаемые изменения зависимости момента сопротивления от скорости (рис. 6).

На рис. 7, а—в приведены результаты компьютерного моделирования движения ротора при различных значениях K и угла θ_1 .



■ Рис. 7. Зависимости $\theta = f(t)$ и $\omega = f(t)$: а — $K = 200 \text{ 1/c}^2$, $\theta_1 = 60 \text{ эл. град}$; б — $K = 400 \text{ 1/c}^2$, $\theta_1 = 60 \text{ эл. град}$; в — $K = 400 \text{ 1/c}^2$, $\theta_1 = 110 \text{ эл. град}$

Для количественной оценки динамики движения ротора по программе можно принять величину максимального угла рассогласования θ_{\max} [5, 6]. Если угол рассогласования не выходит за пределы устойчивой работы двигателя ($|\theta| < 180$ эл. град), то ротор прошел программу разгона синхронно с полем статора и достиг нужной скорости. По величине θ_{\max} можно судить об оптимальности подобранных параметров программы разгона. Чем меньше абсолютное значение θ_{\max} , тем, при прочих равных условиях, программа разгона более эффективна. Таким образом, критерий оптимальности программы разгона можно записать в виде

$$\theta_{\max}(M_{\max}, M_c(\omega), \theta_1, \alpha_{\min}, K) \rightarrow \min.$$

Для исследования влияния отдельных параметров на работу системы удобно результаты представить в виде зависимостей $\theta_{\max} = f(\theta_1)$. Зависи-

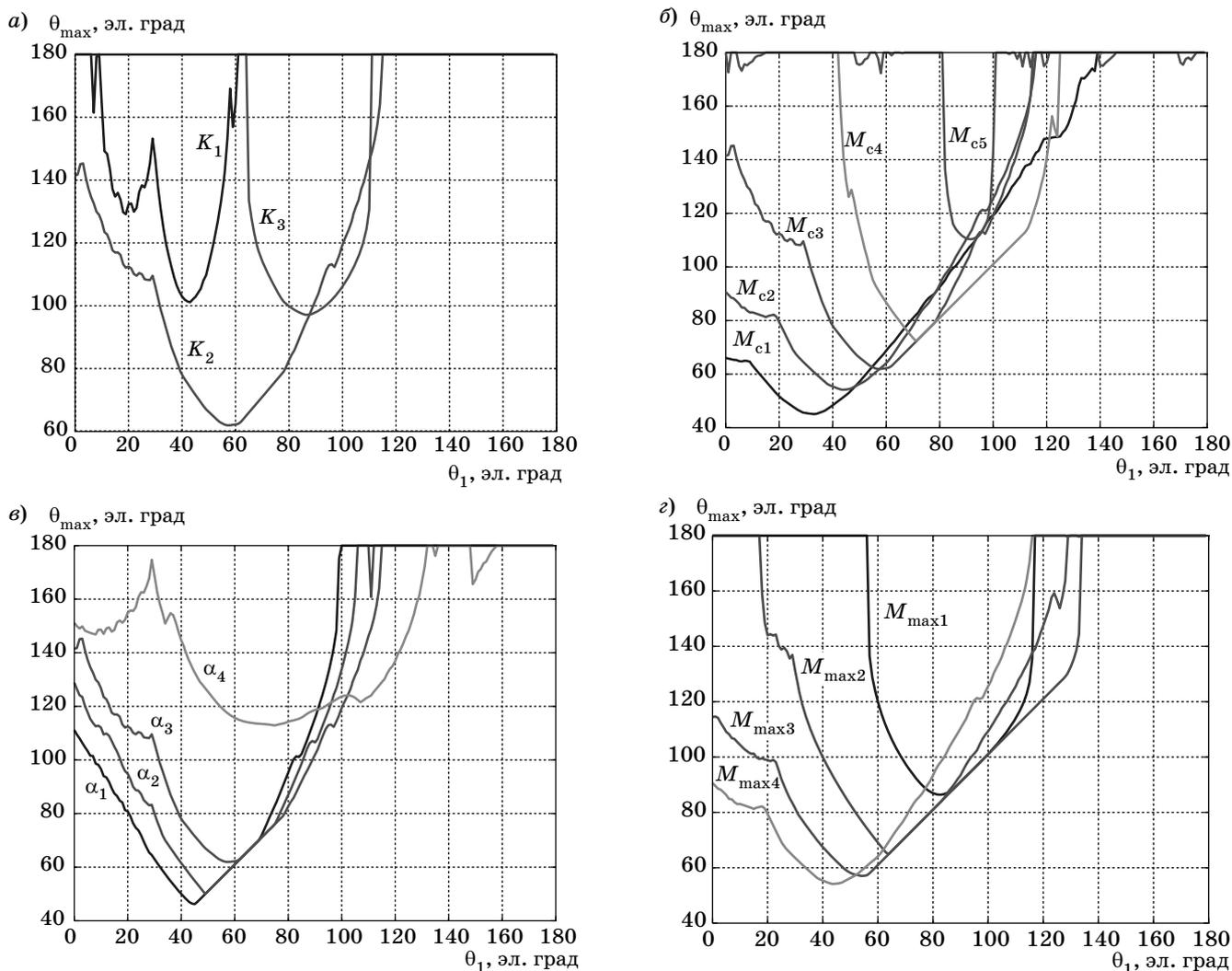
мости, полученные в процессе моделирования, показаны на рис. 8.

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы.

1. Зависимости $\theta_{\max} = f(\theta_1)$ имеют параболический вид, существуют значения угла $\theta_1 = \theta_{1\text{опт}}$, при которых размах колебаний в процессе разгона минимальный. Чем меньше величина максимального угла рассогласования, соответствующего $\theta_{1\text{опт}}$, $\theta_{\max \min}$, и меньше крутизна ветвей (минимум более пологий), тем при прочих равных условиях разгон более надежен.

2. Существует оптимальное значение скорости нарастания частоты K , при котором размах колебаний меньше и разгон обеспечивается в более широком диапазоне изменения θ_1 (см. рис. 8, а).

3. С увеличением момента сопротивления в ГДО величина $\theta_{\max \min}$ растет, а пологость минимума



■ Рис. 8. Зависимости $\theta_{\max} = f(\theta_1)$ при различных значениях: а — скорости нарастания частоты ($K_1 < K_2 < K_3$); б — $M_c(\omega)$; в — шага программы ($\alpha_1 = 3$ эл. град, $\alpha_2 = 15$ эл. град, $\alpha_3 = 30$ эл. град, $\alpha_4 = 60$ эл. град); г — момента двигателя ($M_{\max 1} < M_{\max 2} < M_{\max 3} < M_{\max 4}$)

уменьшается, поэтому целесообразно поиск оптимума крутизны проводить для максимальных значений момента сопротивления (худшего состояния опоры) (см. рис. 8, б).

4. С увеличением момента двигателя величина $\theta_{\max \min}$ снижается, а пологость минимума увеличивается, поэтому целесообразно в приводе использовать максимальное допустимое значение момента двигателя (см. рис. 8, з).

5. Величину углового шага программы целесообразно принимать наименьшей. При этом следует учитывать сложность реализации выбранной величины шага. Например, для трехфазных систем просто реализуется шаг, равный 30 эл. град, одновременно эта величина вполне достаточна для работы (см. рис. 8, в).

Таким образом, число изменяемых параметров уменьшается — остаются только скорость нарастания частоты K и начальный угол рассогласования. Величину углового шага программы, момент двигателя и зависимость момента сопротивления от скорости можно принять неизменными исходными параметрами. Критерий оптимальности упрощается: $\theta_{\max}(\theta_1, K) \rightarrow \min$.

В результате оптимизации получена зависимость $\theta_{\max} = f(\theta_1)$ для оптимального значения $K_{\text{опт}}$ и значения минимума максимального угла рассогласования $\theta_{\max \min}$ и соответствующий ему начальный угол $\theta_{1\text{опт}}$ (рис. 9).

Если рассмотреть фигуру S_0 , ограниченную осями координат и зависимостью $\theta_{\max} = f(\theta_1)$, то минимум площади этой фигуры соответствует оптимально выбранным параметрам программы разгона. В этом случае критерий оптимальности принимает вид $S_0(K) \rightarrow 0$.

Использование критерия S_0 предпочтительно, так как зависимость $\theta_{\max} = f(\theta_1)$ может иметь несколько минимумов из-за дискретного вращения поля статора (см. рис. 8, а).

Если ротор начинает движение из нулевого положения, то целесообразно первый шаг программы принять равным $\theta_{1\text{опт}}$. Таким образом, процесс разгона делится на два этапа: приведение ротора

в некоторое нулевое положение — режим приведения, и частотный разгон. Используя характеристику $\theta_{\max} = f(\theta_1)$, можно определить требования к ошибке приведения ротора в нулевое положение. Величины допустимых ошибок можно определить из выражений

$$\varphi_{\max}^- = \alpha_1 - \theta_{1\max}; \quad \varphi_{\max}^+ = \alpha_1 - \theta_{1\min},$$

где φ_{\max}^- , φ_{\max}^+ — допустимые значения ошибки; $\theta_{1\min}$, $\theta_{1\max}$ — предельные значения углов θ_1 , при которых обеспечивается разгон. Значения выбраны из условия $\theta_{\max} < 150$ эл. град, при этом момент двигателя снижается менее чем в 2 раза.

Простейший способ реализации режима приведения — это подача постоянного тока в течение некоторого времени (импульса тока) в фазы статора так, чтобы вектор сформированного магнитного поля был направлен в нулевое положение. Максимальное возможное значение ошибки $\varphi_{1\max}$ [эл. град] можно определить из условия равновесия ротора, воспользовавшись выражениями

$$\varphi_{1\max} = \pm \arcsin \frac{M_{c0}}{M_{\max}} \frac{180}{\pi};$$

$$\varphi_{1\max} = 180 \pm \arcsin \frac{M_{c0}}{M_{\max}} \frac{180}{\pi}.$$

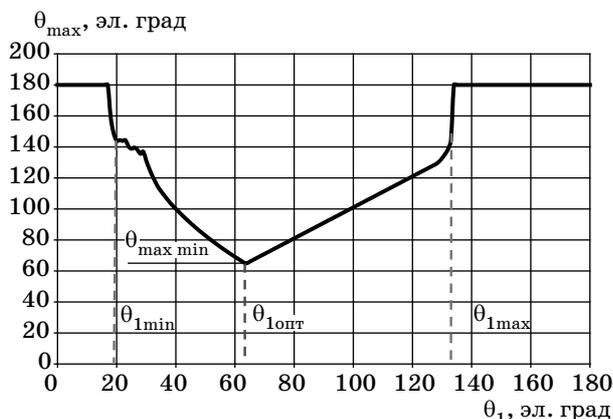
Первое выражение соответствует положению устойчивого равновесия ротора, второе — положению неустойчивого равновесия. Для вывода ротора из неустойчивого положения равновесия необходимо подать несколько импульсов тока. Магнитные поля, вызванные импульсами, должны быть развернуты друг относительно друга на некоторый угол. При подаче двух импульсов приведения выгодно развернуть действие полей на 90 эл. град.

Угловую ошибку можно снизить, если магнитное поле статора в течение действия импульса приведения будет колебаться около нулевого положения с некоторой частотой и амплитудой. Амплитуда колебаний может быть выполнена любой, но для трехфазной системы проще реализуются амплитуды, кратные 30 эл. град. Максимальное возможное значение угловой ошибки можно определить из соотношения

$$\varphi_{1\max} = \pm \arcsin \frac{M_{c0}}{M_{\max}} \frac{180}{\pi} \mp A,$$

где A — амплитуда угловых колебаний поля статора.

Результаты моделирования показали, что частота колебаний должна быть приблизительно в 10 раз выше собственной частоты ротора. Эффективность применения качающегося магнитного поля в режиме приведения выше при больших моментах сухого трения в ГДО. На рис. 10 показаны результаты моделирования движения ротора в ре-



■ Рис. 9. Оптимальная зависимость $\theta_{\max} = f(\theta_1)$

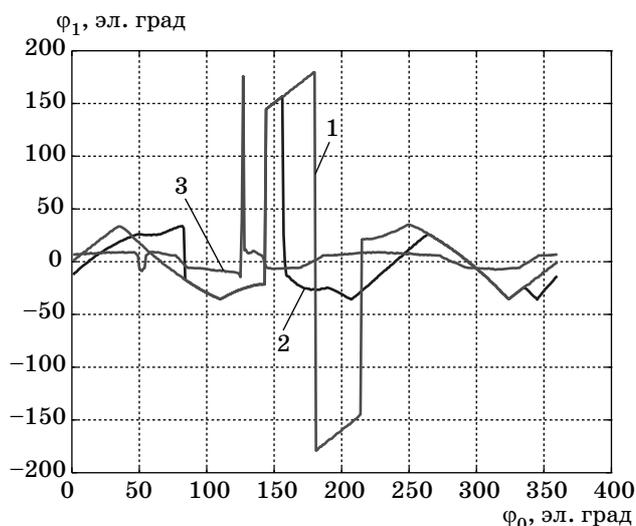


Рис. 10. Зависимости угловой ошибки приведения ротора в нулевое положение от начального положения ротора $\varphi_1 = f(\varphi_0)$ для различных способов реализации режима: 1 — одиночным импульсом; 2 — двумя импульсами; 3 — колеблющимся полем

жиме приведения для различных вариантов реализации режима. Из рисунка видно, что применение колеблющегося поля снижает ошибку приведения ротора в нулевое положение в 4–5 раз.

На основании приведенных исследований можно сделать выводы.

1. Предложенная модель движения ротора в целом правильно отражает характер протекающих процессов и позволяет проводить исследования работы электроприводов в особых режимах.

2. Динамика равноускоренного движения ротора существенно зависит от скорости нарастания частоты вращения поля и начального углового шага программы. Для определенной реализации привода (момента двигателя, зависимости момен-

та сопротивления от скорости и т. д.) существует оптимальное значение крутизны программы и начального шага. В случае с ГДО с большим моментом сопротивления система становится более зависимой к изменениям (отклонениям) параметров.

3. При оптимальных параметрах частотной программы разгона надежность разгона определяется точностью реализации режима приведения ротора в нулевое положение. Минимальная угловая ошибка приведения ротора в нулевое положение получается при подаче в обмотки статора двух (или более) импульсов тока, обеспечивающих создание магнитных полей, развернутых на 90 эл. град. Последний импульс должен быть сформирован так, чтобы его магнитное поле совершало колебания около нулевого положения с частотой, много большей собственной частоты ротора.

Литература

1. **Гироскопические системы.** Элементы гироскопических приборов / Под ред. Д. С. Пельпора. М.: Высш. шк., 1988. 432 с.
2. **Сипенков И. Е. и др.** Прецизионные газовые подшипники / Под ред. А. Ю. Филиппова и И. Е. Сипенкова; ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор». СПб., 2007. 503 с.
3. **Тарасов В. Н., Нагайцев В. И., Останин С. Ю., Павлихина Е. В.** Сравнительная оценка прецизионных гироскопических электроприводов на базе синхронных электродвигателей // Гироскопия и навигация. 1996. № 1 (12). С. 41–47.
4. **Воронин С. Г.** Управление коммутацией вентильного двигателя по сигналам ЭДС вращения // Электричество. 2000. № 9. С. 53–59.
5. **Коршунов А.** Частотный пуск синхронного электродвигателя с постоянными магнитами на роторе // Силовая электроника. 2007. № 1. С. 51–57.
6. **Кан С. Г., Кан Э. М.** Время разгона и торможения гидродвигателей на газодинамических опорах: Сб. трудов МЭИ. М., 1985. № 80. С. 93–98.

УДК 004.434

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОРОЖДАЮЩЕГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ ЯЗЫКА ОПИСАНИЯ ДИАГРАММ

Ф. А. Новиков,

канд. физ.-мат. наук, заведующий лабораторией
Институт прикладной астрономии РАН

К. Б. Степанян,

начальник отдела управления операционного обслуживания
УК «Арсагера»

Язык описания диаграмм *DiaDeL* позволяет формально определить графический синтаксис (нотацию) диаграмм заданного типа и связать нотацию с семантикой, заданной в форме набора классов. В статье обсуждается применение порождающего программирования при реализации этого языка.

Ключевые слова — порождающее программирование, метамоделирование, графический язык, абстрактный синтаксис.

Идея порождающего программирования

В современной компьютерной индустрии порождающее программирование [1] находит все большее применение, так как позволяет автоматизировать и ускорить процесс создания программ. Возможно, наиболее известный пример — это визуальное конструирование приложений [2], которое основывается на генерации кода приложения по заданной визуальной спецификации. В настоящее время порождающее программирование (и, в частности, визуальное конструирование приложений) не способно полностью заменить существующий традиционный способ разработки кода вручную. Это связано с отсутствием такого стандарта визуального конструирования, который обладал бы ясностью, однозначностью и простотой, с одной стороны, и с рядом проблем визуального конструирования, эффективного решения для которых на данный момент не предложено, с другой стороны. Например, создание полной и непротиворечивой визуальной спецификации поведения приложения зачастую более трудоемко, чем реализация этого поведения в виде программы на обычном языке программирования.

Несмотря на то что порождающее программирование не может пока вытеснить написание кода вручную, оно может с успехом использоваться в сочетании с ним — часть приложения автоматически генерируется по спецификации, а часть программируется вручную обычным образом. В этом

случае процесс разработки можно представить в виде диаграммы (рис. 1).

Уточним термины, используемые в статье. Набор сущностей/классов/интерфейсов, специфици-



■ Рис. 1. Цикл разработки с использованием порождающего программирования

цирующий предметную область, мы называем моделью этой области. Набор объектов сущностей и/или экземпляров классов и/или объектов, реализующих интерфейсы, составляющие модель, мы называем экземпляром модели предметной области.

Модель описывается на языке спецификации, понятном генератору. Далее генерируется скелет кода на целевом языке. Затем код дорабатывается вручную и/или используется в других частях приложения.

Модели можно разделить на два класса — статические и динамические. Статические модели формализуют и описывают структуру предметной области, для этого наиболее часто используются диаграммы классов UML [3].

Динамические модели описывают поведение системы, для этого используются диаграммы состояний, диаграммы деятельности (блок-схемы) и т. д. Вопросы генерации кода по динамическим моделям освещены, например, в работах [4, 5].

В данной статье рассматриваются статические модели и генерация кода по ним. Подобный подход был использован при разработке системы автоматического представления диаграмм на языке DiaDeL (Diagram Definition Language) [6, 7]. А именно, методами порождающего программирования была реализована синтаксическая модель языка описания диаграмм DiaDeL.

Порождение модели языка DiaDeL

Язык DiaDeL основан на предположении, что семантика каждой отдельной диаграммы задана в виде набора конкретных программных объектов определенных классов. Набор всех возможных классов объектов, которые могут появляться на диаграммах данного типа, называется семантической моделью, а набор объектов, соответствующих конкретной диаграмме, называется экземпляром ее семантической модели.

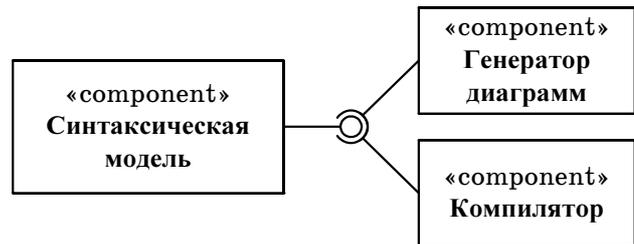
Основным назначением языка DiaDeL является:

- описание нотации (графического синтаксиса) диаграмм и
- описание связи нотации с существующей семантикой.

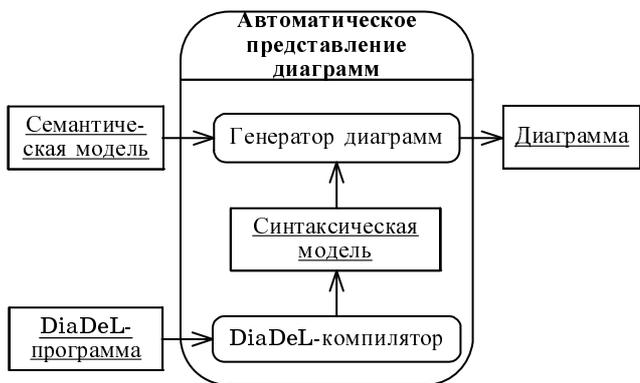
Нотация диаграммы задается в виде описания графических конструкций и графических отношений между ними. Связывание нотации с семантикой является ключевым моментом в описании диаграммы. Для этого элементам из семантической модели, которые должны быть представлены визуально, сопоставляются графические конструкции.

Одним из возможных использований языка DiaDeL является построение системы автоматического представления диаграмм. Основные компоненты системы показаны на рис. 2.

Данная система строит и отображает диаграмму, используя описание на языке DiaDeL и экземпляр семантической модели (рис. 3).



■ Рис. 2. Основные компоненты системы автоматического представления диаграмм



■ Рис. 3. Схема работы системы автоматического представления диаграмм

Синтаксическая модель является программным представлением языка DiaDeL, иными словами, абстрактным синтаксисом. Используя переданное описание диаграммы на языке DiaDeL, компилятор строит экземпляр синтаксической модели. Затем генератор диаграмм (визуализатор), получая построенный экземпляр синтаксической модели и переданный на вход экземпляр семантической модели, строит диаграмму.

Поскольку синтаксическая модель является «фундаментом» в данной системе, то к ней предъявляются жесткие требования по гибкости и связности, а именно:

- синтаксическая модель не должна налагать необоснованных ограничений и должна быть удобна в использовании;
- зависимость других компонентов должна быть сведена к минимуму, т. е. изменения реализации не должны приводить к изменениям в зависимых компонентах.

Для создания системы автоматического построения диаграмм выбрана платформа Eclipse [8]. Eclipse предоставляет множество полезных сервисов и библиотек, но в данной статье мы остановимся только на одной из них — EMF (Eclipse Modeling Framework) [9]. Данная библиотека является основой для построения моделей (сама является метамоделью) и позволяет использовать по-

рождающее программирование для генерации готовых к использованию работоспособных компонентов.

Среди основных преимуществ EMF можно отметить следующие:

- 1) EMF позволяет моделировать на уровне сущностей, атрибутов и отношений между ними;
- 2) сгенерированная модель поддерживает целостность в указанных рамках;
- 3) EMF генерирует модель, используя образец проектирования «Абстрактная фабрика» (Abstract Factory) [10];
- 4) EMF генерирует работоспособный код, не требующий отладки;
- 5) повторная генерация учитывает изменения, внесенные в реализацию вручную;
- 6) сгенерированная модель поддерживает механизм оповещений;
- 7) EMF предоставляет средства для сериализации/десериализации созданных экземпляров моделей;
- 8) EMF позволяет сгенерировать визуальный редактор для создания экземпляров моделей.

Рассмотрим некоторые из перечисленных пунктов подробнее. Первый пункт является одним из самых значительных, поскольку обеспечивает достаточный уровень абстракции для проектирования. Нет необходимости на этапе моделирования учитывать ограничения целевого языка (в нашем случае это Java). Например, EMF обеспечивает поддержку множественного наследования сущностей. Второй пункт, в частности, выражается в обеспечении поддержки двунаправленных ассоциаций между сущностями. Корректно обрабатывается ситуация, когда изменение состояния одного из полюсов ассоциации требует изменения состояния другого (иначе экземпляр модели станет несостоятельным). Хорошим примером может служить отношение один ко многим типа «часть — целое» между двумя сущностями.

Генерация модели с применением образца проектирования «Абстрактная фабрика» позволяет добиться требуемой гибкости и слабой связности. Модель в программе представляется в виде набора интерфейсов, реализующих их классов и фабрики. Важными аспектами являются четвертый и пятый пункты. После генерации не требуется вносить какие-либо изменения для того, чтобы начать использовать модель. Вносимые изменения обычно связаны со спецификацией поведения, отличающегося от стандартного. Если выполняется повторная генерация, внесенные изменения остаются незатронутыми. В силу того, что модель в ходе разработки проекта обычно сама эволюционирует, эта особенность EMF становится бесценной.

В рамках реализации модели языка DiaDeL оставшиеся пункты не имеют большого значения. Однако в общем случае могут быть одними из первых. Например, библиотека EMF использовалась

нами для генерации семантических моделей визуальных языков IDEF0 [11] и ERD [12]. Эти модели были необходимы для создания тестовых примеров. В рамках задачи создания и использования конкретных диаграмм возможность создавать, редактировать, сохранять и подгружать экземпляры модели, используя пользовательский интерфейс, выходит на первый план.

Процесс генерации модели с использованием EMF состоит из следующих шагов.

1. Спецификация модели. Модель может быть задана в разных форматах, в том числе в виде аннотированного Java-кода, Ecore-формата, формата Rational Rose, формата UML- и XML-схемы. Для спецификации модели DiaDeL использовался Ecore-формат как средство, являющееся частью EMF.

2. Задание свойств генерации. Строится модель генерации, в которой каждой сущности модели сопоставляется целевая единица (пакет, класс, перечисление и т. д.) и задаются свойства генерации как для всей модели, так и для отдельных сущностей.

3. Генерация реализации модели. Используя построенную модель и заданную модель генерации, EMF генерирует (возможно, повторно) интерфейсы, их реализацию и фабрику.

4. Генерация редактора. Используя построенную модель и заданную модель генерации, EMF генерирует подключаемый модуль для создания и редактирования экземпляров заданной модели.

Спецификация модели — это очень распространенная задача, которую решают архитекторы при построении приложения. Отнюдь не всегда модель прямо связана с разрабатываемым приложением. Обычно целью спецификации является проектирование и документирование. Разумно было бы использовать спецификацию не только как документ или наглядное представление, но и как входные данные для генерации кода модели. Таким образом, проделав всю ту же работу по моделированию и еще немного (шаги 2 и 3), можно получить работающий код. Альтернатива — написать его вручную. Однако подобная задача может быть весьма и весьма трудоемкой. Например, синтаксическая модель языка DiaDeL содержит более чем 50 сущностей. EMF автоматически генерирует по ним более 120 классов и интерфейсов. Объем сгенерированного кода составляет более двух третей от всего проекта. Автоматически сгенерированный код не всегда является оптимальным с точки зрения объема и быстродействия. Но зачастую это не играет важной роли в разработке бизнес-приложений.

Здесь необходимо уточнить, что EMF не имеет визуального редактора, представляющего модель в виде диаграммы, однако существует бесплатное (или условно бесплатное) программное обеспечение, которое может быть для этого использовано (например, Omondo Eclipse UML [13]).

Заключение

В статье обсуждается использование порождающего программирования для построения синтаксической модели языка описания диаграмм DiaDeL. Приведена общая архитектура разработанной системы автоматического представления диаграмм. Описаны преимущества библиотеки EMF и ее применение в качестве генератора статических моделей.

В основе архитектуры разработанной системы лежит синтаксическая модель языка DiaDeL, от которой зависят другие компоненты системы. Как следствие, к реализации модели предъявляются довольно жесткие требования по гибкости и связности. Также реализацию модели требовалось получить, используя подход порождающего программирования. Для решения поставленных задач была выбрана библиотека EMF.

Опыт применения EMF показал, что генерируемые модели удовлетворяют поставленным требованиям и имеют ряд других преимуществ (работоспособность, поддержка целостности, механизмы

оповещений и т. д.). Помимо самих моделей, EMF также позволяет генерировать полнофункциональный редактор для них. Подводя итог, можно смело утверждать, что библиотека EMF является эффективным и удобным средством, реализующим идею порождающего программирования. Использование подхода, представленного на рис. 1, вкупе с EMF позволяет автоматизировать процесс разработки программного обеспечения и повысить эффективность работы, не теряя при этом гибкости кода. Обратной стороной являются незначительные потери оптимальности в смысле требуемой памяти и скорости работы. Однако при разработке бизнес-приложений это незначительная плата. А если учитывать существующую скорость развития аппаратных средств, то в ближайшем будущем на это можно будет и вовсе не обращать внимания.

Поскольку общая архитектура системы автоматического представления диаграмм имеет типовую структуру, описанный случай является достаточно распространенным. Авторы более чем уверены в эффективности применения порождающего программирования.

Литература

1. Чарнецки К., Айзенкер У. Порождающее программирование: методы, инструменты, применение. СПб.: Питер, 2005. 736 с.
2. Новиков Ф. А. Визуальное конструирование программ // Информационно-управляющие системы. 2005. № 6. С. 9–22.
3. Буч Г., Якобсон А., Рамбо Д. UML. 2-е изд. СПб.: Питер, 2006.
4. Канжелев С., Шалыто А. Автоматическая генерация кода программ с явным выделением состояний // Paths to Competitive Advantage: Software Engineering Conference. М., 2006. С. 60–63.
5. Канжелев С., Шалыто А. Преобразование графов переходов, представленных в формате MS Visio, в исходные коды программ для различных языков программирования (инструментальное средство Meta-Auto). 102 с. <http://is.ifmo.ru/projects/metaauto>
6. Степанян К. Б. Язык описания диаграмм // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2006. № 6-1. С. 36–41.
7. Новиков Ф. А., Степанян К. Б. Язык описания диаграмм // Информационно-управляющие системы. 2007. № 4. С. 28–36.
8. <http://www.eclipse.org>
9. <http://www.eclipse.org/modeling/emf/>
10. Гамма Э., Хелм Р., Джонсон Р., Влиссидес Дж. Приемы объектно-ориентированного проектирования. Паттерны проектирования. СПб.: Питер, 2004.
11. National Institute of Standards and Technology. Integration Definition For Function Modeling (IDEF0). Washington: Draft Federal Information, 1993. <http://www.itl.nist.gov/fipspubs/idef02.doc>
12. Chen P. P-S. The Entity-Relationship Model — Toward a Unified View Of Data // ACM Transactions on Database Systems. 1976. Vol. 1. N 1.
13. Omondo. Eclipse UML. <http://www.omondo.com>

УДК 519.687.1

ВИРТУАЛЬНЫЕ ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ ГРИД-ВЫЧИСЛЕНИЙ

А. Ю. Первин,

инженер-программист

А. А. Московский,

канд. хим. наук, старший научный сотрудник

Институт программных систем РАН

Разработано программное обеспечение для развертывания и управления приложениями, работающими внутри виртуальных машин. Созданы и протестированы следующие приложения: вычислительный сервис и веб-сервис. Составлены профили этих приложений и изучены зависимости между производительностью приложений и ресурсами. Представлены промежуточные результаты активного исследования, направленного на изучение вопросов управления аппаратными ресурсами с использованием математической теории.

Ключевые слова — виртуальные машины, виртуальные сервисы, соглашения об уровне сервиса, оптимальное управление.

Введение

Цель настоящего исследования состоит в разработке методов и средств управления приложениями, работающими на вычислительном кластере в виртуальной среде. При работе на традиционных кластерах количество вычислительных узлов, используемых тем или иным приложением, служит в качестве основной и естественной метрики потребления ресурсов. При использовании виртуальных машин (виртуальная машина (ВМ) — программная среда, эмулирующая работу реального, физического компьютера) также можно задействовать эту метрику для распределения ресурсов. Однако, в дополнение к этому, технология ВМ предлагает целый ряд новых возможностей по управлению ресурсами, которые сложно или невозможно реализовать при использовании традиционных компьютеров. В частности, виртуальную машину Xen [1] можно:

- приостановить и сохранить ее состояние в памяти, понизив нагрузку на процессор для последующего запуска других приложений;
- остановить и сохранить ее состояние на диск, предоставляя, таким образом, возможность использовать ресурсы другими, более приоритетными с точки зрения пользователя, ВМ;
- переместить с одного физического компьютера на другой;
- запустить с некоторым числом процессоров, а затем добавлять или убирать процессоры во время работы ВМ с учетом потребностей других ВМ;
- запустить с некоторой долей процессора и затем увеличивать или уменьшать ее, исходя из потребностей приложений, работающих внутри ВМ;

- запустить с некоторым объемом оперативной памяти и затем, по мере необходимости, изменить его;

- запустить с ограниченной сетевой пропускной способностью и динамически изменять этот параметр в зависимости от потребностей приложений ВМ.

Столь значительная гибкость настроек ВМ способствует оптимальному использованию ресурсов, поскольку можно выделять приложению ровно столько ресурсов, сколько ему требуется, повышая, тем самым, КПД аппаратных средств. Консолидация ВМ и автоматическое перераспределение ресурсов, основанное на загруженности приложений и их приоритетах, предоставляет ИТ-администраторам возможность обеспечивать корректную работу большего числа сервисов в рамках имеющейся инфраструктуры.

Использование технологий виртуализации вычислительных ресурсов актуально, в том числе, и для грид-среды, где ВМ позволяют значительно упростить задачу автоматизации распределения ресурсов и управления конфигурацией узлов грида [2, 3]. Однако на нынешний день многие преимущества ВМ до сих пор используются не в полной мере. Так, например, сейчас сравнительно мало систем, применяющих ВМ для эффективно-го потребления простаивающих мощностей компьютеров [4–6]. Мы считаем перспективной концепцию предоставления части аппаратных ресурсов компьютеров различным сервисам с помощью ВМ. Для грид-систем, служащих вычислительной площадкой одновременно для многих приложе-

ний, критически важно иметь формализованные средства для автоматического распределения ресурсов. То же самое верно и для крупных центров обработки данных (ЦОД): время и внимание системного администратора может стоить дорого, а медленная реакция на события — привести к катастрофе.

Проекты в этом направлении активно ведутся как в коммерческих, так и в академических организациях. Среди них можно выделить инициативы *Amazon EC3* и *3Tera Applogic* — широко известные коммерческие платформы, предназначенные для размещения сетевых сервисов на ВМ. Проект *Cluster-on-Demand* [7] предоставляет средства для создания виртуальных кластеров из ВМ. В проекте *Virtual Workspaces* ВМ используются в грид-среде для изоляции приложений от аппаратного окружения с помощью промежуточного программного обеспечения *Globus Toolkit* [8]. *SoftUDC* [9] — это платформа для «коммунальных вычислений», в которой виртуализируются такие ресурсы, как процессор, дисковая память и сетевая пропускная способность. При распределении ресурсов в виртуальном окружении иногда используются экономические модели. Так, например, в системе *Shirako* [10] предложен механизм, позволяющий приложениям и самой среде заключать контракты на аренду ресурсов, в то время как в проекте *Tycoon* [11] используется модель аукциона для распределения ресурсов.

Представляется возможным сделать следующий шаг вперед: системы автоматического управления ресурсами могут учитывать, какую ценность имеют выделенные приложению процессорные мощности, память или другие ресурсы при текущей пользовательской нагрузке. Обладая этой информацией, можно точно определить, каким образом следует наращивать ресурсы, доступные приложению, и когда можно затребовать эти ресурсы обратно.

В ходе настоящего исследования разработано программное обеспечение, которое позволяет экспериментировать с различными схемами распределения ресурсов. При этом во внимание принимаются следующие предположения:

- любое приложение имеет набор параметров, которые однозначно определяют качество предоставляемого приложением сервиса с точки зрения конечных пользователей (например, время отклика для веб-сайта). При этом параметры могут быть измерены во время работы приложения;
- с помощью технологии ВМ различные аппаратные ресурсы могут назначаться приложениям динамически с достаточно высокой степенью точности и, как следствие, эти ресурсы могут рассматриваться как непрерывные величины.

С этими предположениями задача управления качеством сервиса приложения может рассматриваться как задача непрерывного оптимального управления. Такой подход значительно отличается

обсуждаемое исследование от аналогичных работ в области управления качеством сервиса [12–14]. В данной работе приложения рассматриваются как черные ящики, и среда времени исполнения может использовать мощные методы теории оптимального управления для реализации схем эффективного распределения ресурсов.

Для того чтобы автоматизировать процесс принятия решения относительно целесообразности тех или иных ресурсов для приложения, предлагается использовать абстракцию *уровень сервиса*. Среда времени исполнения может использовать информацию с датчиков, описывающих текущее состояние приложения, наряду с *профилем производительности* этого приложения для выработки алгоритма поддержки требуемого уровня сервиса приложения. В ситуации дефицита ресурсов система может отнимать ресурсы у менее важных, с точки зрения пользователей, приложений. При этом профили производительности могут быть составлены либо на испытательном стенде до запуска сервиса в эксплуатацию, либо непосредственно в процессе работы сервиса.

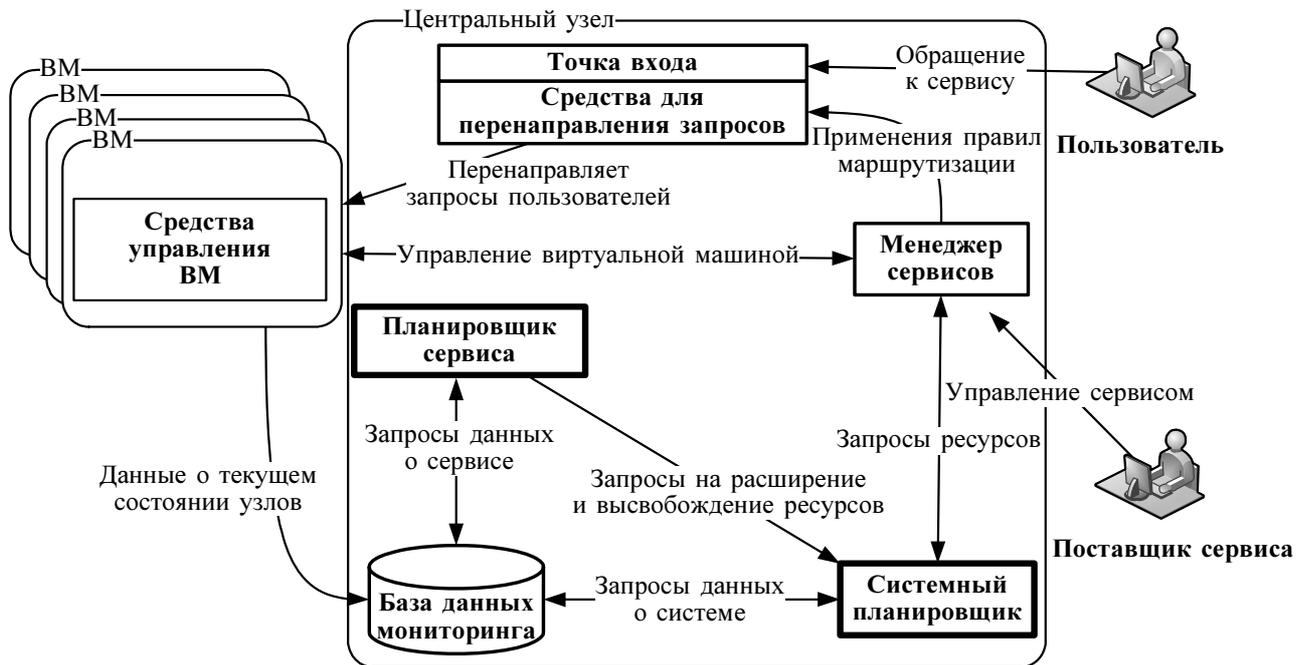
В рамках исследования ставится задача реализовать различные типы виртуальных приложений (*virtual appliances*¹) и способы управления ими в условиях меняющейся нагрузки на эти приложения. Для исследования поставленных задач, прежде всего, необходима инфраструктура для развертывания, мониторинга и распределения ресурсов виртуальных приложений. В следующем разделе рассматривается архитектура реализованной среды «виртуальные сервисы», служащей в качестве такой инфраструктуры.

Затем необходимы модели или профили производительности приложений. Эта информация будет не только описывать оптимальный состав аппаратных ресурсов для заданной нагрузки, но также характеризовать эффект от добавления или изъятия тех или иных ресурсов у приложения. Далее приведена концепция профилей производительности. Наконец, необходим специальный регулятор, который бы использовал профили производительности и информацию времени исполнения для перераспределения ресурсов в целях оптимизации их использования.

Архитектура среды «виртуальные сервисы»

Для решения поставленных задач была реализована простая система, которая позволяет развертывать *виртуальные сервисы* — параллельные

¹ Термин «virtual appliance» пока не имеет устоявшегося перевода на русский язык. В литературе встречается обозначение «шаблон виртуальной машины», однако, на наш взгляд, такой перевод недостаточно точно отражает оригинальный смысл этого термина. Мы используем термин «виртуальное приложение», чтобы подчеркнуть связь пары «приложение» и «виртуальная машина». Виртуальным приложением может быть как готовая к использованию программа (например, веб-сайт), так и промежуточный компонент системы.



■ Рис. 1. Компоненты системы «виртуальные сервисы»

виртуальные приложения. Виртуальные приложения представляют собой либо сетевые сервисы, либо вычислительные параллельные приложения, работающие внутри одной или нескольких VM. Другими примерами таких приложений могут быть законченные решения в виде сервисов сетевых игр, средств обработки данных и т. п. Для управления VM используется Xen — монитор виртуальных машин с открытым исходным кодом, однако принципы, заложенные в системе, могут быть перенесены на любую другую, аналогичную по функциональности, платформу. На рис. 1 представлены основные компоненты системы и схема их взаимодействия.

Нормальная эксплуатация системы подразумевает наличие *поставщика сервиса*, который запускает сервисы, и пользователей, подключающихся к сервису через так называемую *точку входа* — пары IP-адреса и сетевого порта. Среда предоставляет, в частности, такие функции:

- запуск и останов сервиса. Запуск сервиса подразумевает запуск одной или нескольких VM с соответствующим виртуальным диском (образом файловой системы), установку правил маршрутизации сетевого трафика и создание виртуальной сети из VM, предназначенных для этого сервиса;
- выделение и высвобождение ресурсов сервиса. Запросы на ресурсы могут быть инициированы вручную поставщиком сервиса или программно специальной компонентой — *планировщиком сервиса*;
- перенаправление сетевого трафика. Эта функция необходима для обеспечения доступа пользо-

вателей к приложениям в виртуальной среде. Также используется для балансировки нагрузки.

Гибкость в управлении ресурсами VM играет ключевую роль в этом исследовании. В то же время существенное значение имеет возможность использовать разнообразные алгоритмы для управления всей системой в целом. В связи с этим применяется двухслойный механизм распределения ресурсов — для разделения системного и сервисного слоев. На сервисном слое встраиваемый планировщик сервиса, учитывая данные мониторинга вычислительного узла, принимает решения о потребности в дополнительных или, наоборот, исключении неиспользуемых ресурсов для этого сервиса. На верхнем слое *системный планировщик* при поиске оптимального распределения ресурсов между сервисами учитывает договоренности между поставщиками сервисов и администратором, выраженные в приоритетах сервисов. Кроме того, системный планировщик может использовать профиль производительности приложения в случае, если ему требуется оценить различные варианты распределения ресурсов. Оба планировщика способны взаимодействовать между собой и использовать необходимые им данные мониторинга. Система автоматически поддерживает объем ресурсов, доступный приложению и необходимый ему для обеспечения заданного уровня сервиса. В случае выхода из строя физического компьютера, на котором находится VM, среда автоматически создаст аналогичную VM на одном из свободных компьютеров. Для отслеживания таких ситуаций используются методики, применяемые в решениях «высокой доступности».

Разработанные приложения

В настоящий момент система поддерживает три виртуальных приложения. Для каждого приложения подготовлен соответствующий образ ВМ и средства поддержки (конфигурационные файлы, планировщики и т. д.).

WebMapServer. Это приложение [15] позволяет запрашивать различную информацию по географическим картам. В тестах использовались данные по округу Итаска штата Миннесота, полученные через Геологическую службу США. Отображаемые пользователем страницы содержат сгенерированные по запросу фрагменты карты в формате GIF.

X-Com. Вычислительный сервис основан на программном обеспечении X-Com. X-Com [16] — система метакомпьютинга, разработанная в МГУ им. М. В. Ломоносова. X-Com чем-то напоминает систему распределенных вычислений Condor [17], однако реализация X-Com значительно более компактна, менее требовательна к ресурсам, проще в установке и эксплуатации. Кроме того, система X-Com может работать в самых различных окружениях: вычислительные кластеры, федерации кластеров, грид-среды, совокупности гетерогенных процессоров, очереди задач и т. д.

Виртуальный кластер. Этот сервис позволяет запускать требуемое число ВМ с поддержкой сетевого подключения между ними. В результате запуска этого сервиса создается набор виртуальных узлов, формирующих *виртуальный кластер*. Сетевая поддержка реализуется с помощью механизма bridging. Он позволяет включать ВМ в виртуальный кластер абсолютно прозрачным для пользователя образом. Поэтому пользователи могут взаимодействовать с узлами виртуального кластера без какой-либо дополнительной настройки, так, как если бы это был обычный компьютер.

По результатам проведенных вычислительных экспериментов в виртуальном кластере было показано, что в таком окружении можно работать с полноценными MPI-приложениями, использующими несколько виртуальных узлов кластера одновременно. Кроме того, проведены успешные эксперименты по запуску параллельных программ, созданных с помощью средства быстрой разработки параллельных приложений **OpenTS** [18].

При разработке виртуальных приложений следует уделить особое внимание специфике решаемой этим приложением задачи. Как правило, дисковый образ ВМ содержит только те программные компоненты, которые необходимы для решения возложенной на приложение задачи. Такое «урезание» образа ВМ положительно влияет на его размер, однако, можно пойти дальше и специализировать операционную систему ВМ под нужды того приложения, которое будет эксплуатироваться на этой машине. Так, например, для суперкомпьютера Cray XT3 разработано специальное легковесное ядро ОС Linux [19], в котором пол-

ностью отключена виртуальная память и введен ряд других ограничений, которые позволяют существенно повысить производительность приложений.

Профиль производительности

Профиль производительности приложения иллюстрирует зависимость между объемом ресурсов, предоставленных этому приложению, генерируемой на это приложение пользовательской активностью и уровнем сервиса, который обеспечивает это приложение пользователям. Объем ресурсов может быть выражен в абсолютных (например, 1 Гбайт оперативной памяти) или в относительных (53 % процессора) значениях. Пользовательская активность определяется для каждого приложения отдельно. Так, например, для веб-сайта пользовательская активность выражается количеством пользователей в секунду, обращающихся к этому сайту (частота запросов). Наконец, уровень сервиса может быть измерен как разница между желаемым (целевым) состоянием сервиса и его текущим состоянием. Концепция уровня сервиса подробно обсуждается в следующем разделе.

Эта зависимость может быть выражена в табличной форме. В таблице описываются некоторые типичные сценарии использования приложения с разными уровнями пользовательской активности. С помощью методов интерполяции и экстраполяции могут быть получены значения, не вошедшие в таблицу. Данные для этой таблицы могут быть собраны с помощью утилит нагрузочного тестирования, например **httperf** [20]. Полагаем, что при достаточном объеме данных в таблицах такой подход может дать хорошие результаты в задаче распределения ресурсов.

В ходе исследования были выполнены замеры производительности с различными уровнями пользовательской нагрузки и объемом ресурсов, выделенных сервису. В настоящий момент можно варьировать следующие параметры ВМ: объем оперативной памяти, число виртуальных процессоров, используемых ВМ (VCPU), и долю процессорного времени, определяющую максимальное значение (в процентах) процессорного времени физического компьютера, которое может занимать ВМ. Пользовательская нагрузка в каждом тестовом запуске задавалась таким образом, чтобы максимизировать использование ресурсов, предоставленных сервису, и в то же время минимизировать число сетевых ошибок (таких как, например, закрытие соединения по тайм-ауту). Мы называем такие уровни нагрузки *точками перегиба*. Это такая максимальная пользовательская нагрузка, которую сервис в состоянии обработать корректно.

Профилировка производительности WebMapServer показала, что это приложение слабо чувствительно к объему оперативной памяти: было отмечено незначительное отклонение максимальной частоты запросов (рис. 2). Увеличение числа

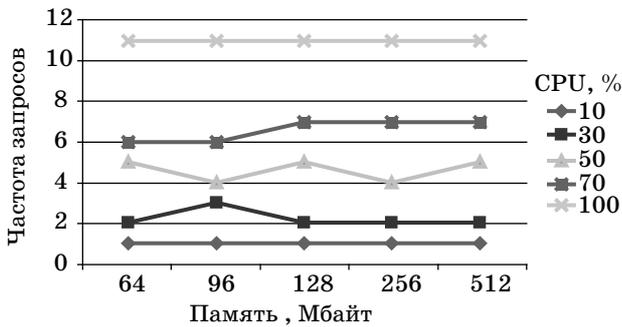


Рис. 2. Нагрузка на сервис WebMapServer при различных объемах памяти и долях процессора

виртуальных процессоров не увеличило, а наоборот — снизило производительность (рис. 3). Такое поведение, очевидно, вызвано тем, что приложение является однопоточным и, как следствие, не использует дополнительные процессоры. В то

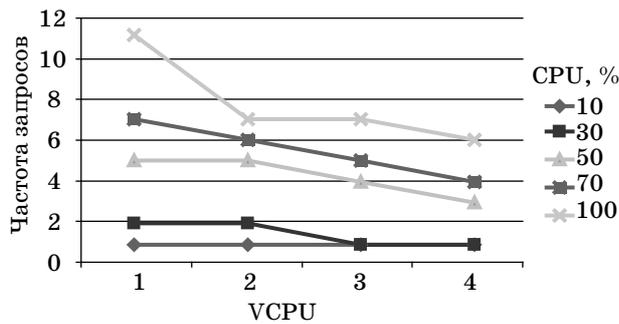


Рис. 3. Нагрузка на сервис WebMapServer при различном количестве VCPU и долях процессора

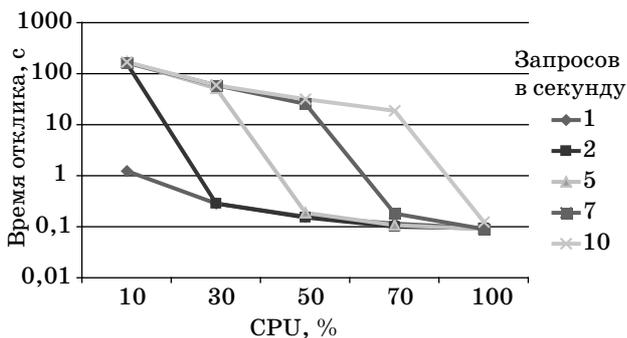


Рис. 4. Время отклика WebMapServer и доли процессора при различных уровнях нагрузки

же время параметр, отвечающий за долю физического процессора, предоставляемую ВМ, оказывал наибольшее влияние на производительность приложения. Зависимость между максимальной частотой запросов и долей процессора оказалась почти линейной.

Как можно видеть на рис. 4, при нагрузке в 10 запросов в секунду уровень сервиса весьма чувствителен к доле процессорного времени: необходимо, по меньшей мере, 70 % процессорного времени для обработки запросов за разумное время (около 1 с). В то же время нагрузка в 1 запрос в секунду может быть корректно обработана и при 10 % процессорного времени.

Профили производительности могут использоваться для оценки различных вариантов размещения ресурсов без непосредственного воздействия на производительность приложений, работающих в системе.

Соглашения об уровне сервиса

Рассмотрим ситуацию, когда владелец веб-сайта желает поддерживать среднее время отклика своего сайта ниже некоторого порогового значения (например, менее 1 с). В случае, если этот веб-сайт испытывает высокую пользовательскую нагрузку, могут потребоваться дополнительные вычислительные ресурсы для поддержания уровня сервиса в требуемом интервале. Такой уровень сервиса называется *целевым*. В описанном сценарии вполне естественно обратиться к помощи автоматических средств, поскольку ручное вмешательство может быть слишком медленным и порождать ошибки.

Одна из возможных схем управления уровнем сервиса показана на рис. 5. Это классическая схема управления с обратной связью. Для того чтобы повторно использовать алгоритмы, заложенные в *оптимизаторе*, работающем на системном уровне, необходимо иметь средства для преобразования *наблюдаемых параметров* приложения (таких как, например, время отклика) в абстрактное значение уровня сервиса [21]. Именно для этой цели вводится *функция уровня сервиса*, идея которой состоит в следующем.

Функция принимает наблюдаемые параметры приложения в качестве входного аргумента и возвращает значение уровня сервиса в интервале от 0 до 100 %. Затем эти значения передаются оптимизатору, который, в свою очередь, отыскивает оптимальное распределение ресурсов между одним или несколькими виртуальными приложениями.

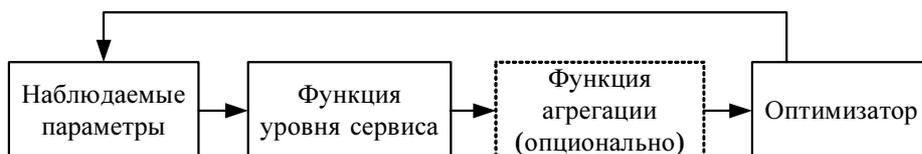


Рис. 5. Схема управления

С этой целью уровни сервисов приложений максимизируются путем вариации объема ресурсов приложения.

Функция уровня сервиса определяется уникальным образом для каждого типа виртуального приложения, поскольку наблюдаемые параметры и целевые уровни приложений различаются. Таким образом, для приложения веб-сайт, уровень сервиса которого определяется как ограниченное снизу некоторой величиной среднее время отклика, наблюдаемые параметры должны включать (по меньшей мере) текущее время отклика. В то же время для вычислительного сервиса с предельным сроком, к которому должен быть выполнен расчет (дедлайн), наблюдаемые параметры описывают среднюю скорость счета. В этом случае оптимальной будет такая скорость вычислений, при которой расчет завершится к назначенному сроку и при этом не будут использованы лишние ресурсы.

Поскольку используемые функции уровня сервиса непрерывны, можно применять методы непрерывной оптимизации в оптимизаторе. В общем случае функция уровня сервиса имеет вид «переключателя» и записывается в форме

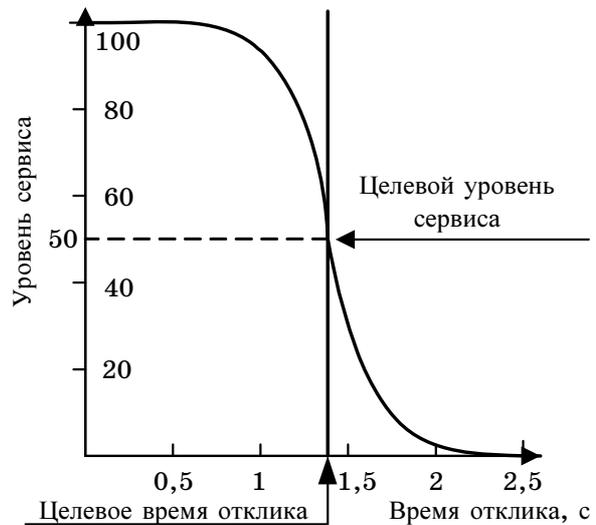
$$s(x) = \frac{wa(b-x)}{\sqrt{1+(a(b-x))^2}} + w,$$

где s — уровень сервиса; x — наблюдаемые параметры (например, время отклика); w , a и b — параметры функции, позволяющие адаптировать ее под конкретное приложение.

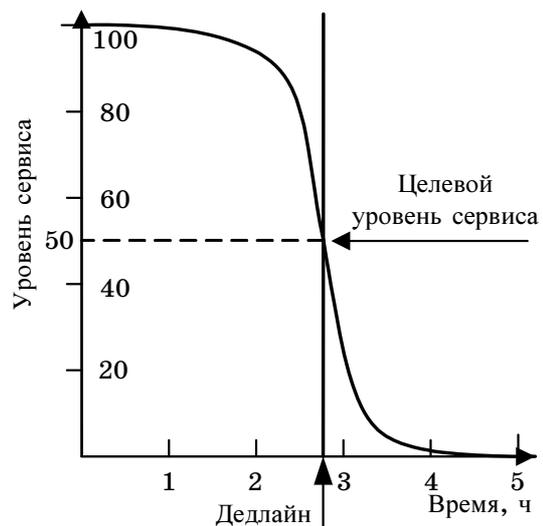
Мы предлагаем использовать значение 50 % в качестве целевого уровня сервиса для любого приложения. В этой точке соглашения об уровне сервиса будут строго соблюдаться. Значение 50 выбрано потому, что функция в окрестности этой точки изменяется максимально быстро и, следовательно, здесь оптимизационные алгоритмы будут наиболее эффективны.

Изменяя параметры функции уровня сервиса, можно задавать мягкие и жесткие требования к уровню сервиса. Рассмотрим функцию 1 с параметрами: $a = 10$, $b = 1$ и $w = 0,5$. Эти параметры используются для виртуального приложения веб-сайт. Эта функция равна почти 100 % при $x < 1$ с и быстро уменьшается до нуля при времени отклика больше 1,5 с (рис. 6). Параметры кривой должны быть тщательным образом подобраны так, чтобы соответствовать характеристикам производительности приложения и его целевому уровню сервиса. Концепция уровня сервиса может быть естественным образом обобщена для случая многих наблюдаемых параметров, когда кроме времени отклика отслеживается, например, процент сетевых ошибок.

Очевидно, что этот подход применим не только для веб-сайтов, а может быть естественным образом расширен на другие типы приложений. В част-



■ Рис. 6. Кривая уровня сервиса для веб-сайта



■ Рис. 7. Кривая уровня сервиса для вычислительного сервиса

ности, можно использовать его для очередей задач. Как было отмечено раньше, поставщик сервиса может указать дедлайн, к которому задачи в очереди должны быть рассчитаны (рис. 7). Изменив примерную вычислительную сложность задач, можно посчитать текущую скорость расчета и найти оценочное время завершения. Если системе удастся решить задачу в срок, тогда уровень сервиса этого приложения равен 50 %. В противном случае он будет снижаться до 0 %, т. е. когда результаты вычислений будут уже не нужны (например, прогноз погоды на завтрашний день, полученный три месяца спустя).

В реальных условиях система должна быть способна работать с несколькими приложениями одновременно. Агрегация n уровней сервиса в один

может быть выполнена с помощью взвешенного произведения:

$$\sigma(x_1, \dots, x_n) = \prod_{i=1}^n w_i S_i(x_i),$$

где σ — общий уровень сервиса системы; w_i — относительные веса (приоритеты) приложений; S_i — уровни сервисов приложений. Таким образом, максимизируя σ , система должна форсировать завершение сервиса прогноза погоды завтрашнего дня к полудню сегодняшнего ценой, возможно, некоторого неудобства утренних посетителей веб-сайта. Ряд методов оптимального управления может быть использован для максимизации σ , например динамическое программирование.

Промежуточная реализация алгоритма оптимизации

В настоящее время используется простая одномерная условная оптимизация для поиска оптимального объема ресурсов, необходимого приложению. Рассмотрим пример с вычислительным сервисом. Алгоритм, описанный ниже, пытается найти минимальную долю процессора, при которой будут выполняться соглашения об уровне сервиса, используя метод двоичного поиска.

На первом этапе находятся границы интервала возможных долей процессора, среди которых будет производиться поиск. Поиск начинается с некоторой грубой оценки объема требуемых приложению ресурсов. Если текущий уровень сервиса приложения ниже целевого (случай I), тогда значение оценки будет выше текущего объема доступных приложению ресурсов. В противном случае, этот параметр будет снижаться (случай II). Далее этот шаг повторяется с увеличивающимся значением оценки, причем на каждом шаге оценка будет увеличиваться вдвое, до тех пор, пока текущий уровень сервиса приложения не достигнет некоторого значения, близкого к целевому уровню сервиса (выше целевого уровня сервиса в случае I и ниже — в случае II).

На втором этапе алгоритм отыскивает в интервале, образованном двумя последними значениями, полученными на предыдущем этапе, величину оптимальной доли процессора для этого приложения. Для ускорения процесса используется метод половинного деления. На этом шаге доля процессора в распоряжении приложения последовательно увеличивается (или уменьшается) и замеряется новый уровень сервиса приложения. В случае, если приложению требуется более одного процессора, автоматически производится запуск дополнительных ВМ с этим приложением. Этот алгоритм периодически запускается через равные интервалы времени. Таким образом, уровень сервиса приложения поддерживается в заданном интервале автоматически. Существующая реализация, безусловно, является весьма упрощенной, тем не

менее, все же применима к различным приложениям. Так, например, этот алгоритм использовался для динамического распределения ресурсов вычислительного сервиса X-Com в процессе его работы. Приложение X-Com было запущено с некоторым предустановленным дедлайном, к которому требовалось завершить расчет, и объемом ресурсов, заведомо недостаточным для выполнения поставленной задачи. Однако, используя описанный выше алгоритм, система увеличила объем ресурсов приложения так, чтобы все задачи были посчитаны точно к сроку. Эксперименты показали отклонение фактического времени завершения от запланированного лишь на 0,5%. Например, задача, рассчитываемая в течение 40 мин, была закончена лишь на 10–15 с позже заданного срока.

Выводы

В ходе исследования была разработана платформа для управления приложениями, работающими в ВМ Xen. С помощью компонент системы можно запускать и останавливать сервисы, динамически увеличивать или уменьшать объем доступных сервисам ресурсов. Представлена простая модель автоматизации управления уровнем сервиса приложений, использующая методы условной оптимизации. На базе платформы был протестирован ряд приложений в целях составления профилей производительности для последующей разработки более точных и эффективных моделей управления ресурсами виртуальных приложений. Используемый подход не привязан исключительно к виртуальным сервисам и может быть использован в других средах, таких как Virtual Workspaces или Cluster-on-Demand.

Можно возразить, что изменение доли физического процессора, предоставленного ВМ, в процессе работы приложения или полный отказ ВМ может нанести ущерб производительности вычислительных приложений, работающих в таком окружении. Действительно, большинство существующих сегодня MPI-приложений не смогут работать в такой среде эффективно, поскольку они были спроектированы для работы в однородных вычислительных системах и не смогут корректно работать в случае аварийного завершения даже одного параллельного процесса. Однако более совершенные параллельные приложения, учитывающие неоднородность и нестабильность вычислительной среды, смогут работать в таких условиях. В качестве примера можно упомянуть разработку MapReduce [22] — это универсальная среда общего назначения, которая могла бы справиться с дополнительной сложностью технологий виртуализации. Учитывая те огромные усилия, которые прилагают участники ИТ-сообщества для улучшения высокоуровневых средств параллельного программирования, можно ожидать, что в будущем такие приложения получат широкое распространение.

Литература

1. **Xen hypervisor.** <http://www.xen.org/>
2. **Keahey K. et al.** Virtual workspaces in the grid: Proc. of the 11th Euro-Par Conf. Lisbon, 2005.
3. **Youseff L., Wolski R., Gorda B., Krintz C.** Paravirtualization for HPC Systems // Workshop on Xen in HPC Cluster and Grid Computing Environments. Sorrento, 2006. P. 474–486.
4. **Novaes R., Roisenberg P., Scheer R. et al.** Non-Dedicated Distributed Environment // A Solution for Safe and Continuous Exploitation of Idle Cycle: Workshop on Adaptive Grid Middleware. 2003.
5. **Абрамов С., Московский А., Первин А., Коряка Ф.** Развертывание испытательного полигона для Grid-приложений в Переславле-Залесском // Распределенные вычисления и грид-технологии в науке и образовании. Дубна, 2006.
6. **Andersen R., Vinter B.** Harvesting idle Windows CPU cycles for grid computing // Int. Conf. on Grid Computing and Application. Las-Vegas, 2006. P. 121–126.
7. **Moore J. et al.** Managing mixed-use cluster with Cluster-on-Demand. Durham: Duke University Press, 2002.
8. **Sotomayor B.** A resource management model for VM based virtual workspaces. University of Chicago, 2007.
9. **Kallahalla M., Uysal M., Swaminathan R. et al.** SoftUDC: a software-based data center for utility computing // IEEE Computer Society Press. Los Alamitos, 2004.
10. **Fu Y., Chase J., Chun B., Schwab S., Vahdat A.** SHARP: an architecture for secure resource peering // ACM SIGOPS Operating Systems Review. 2003. Vol. 37. N 5. P. 133–148.
11. **Lai K., Rasmusson L., Adar E. et al.** Tycoon: an implementation of a distributed market-based resource allocation system. Palo Alto: HP Labs, 2004.
12. **Moroni S., Joffre A., Figueroa N. et al.** A game-theoretic framework for optimal SLA / contract creation. Palo Alto: HP Labs, 2007.
13. **Bennani M., Menasce D.** Resource Allocation for Autonomic Data Centers using Analytic Performance Models: Proc. of the Second Int. Conf. on Autonomic Computing // IEEE Computer Society Press. Washington, 2006.
14. **Menasce D., Bennani M.** Autonomic Virtualized Environment: Int. Conf. on Autonomic and Autonomous Systems // IEEE Computer Society Press. Washington, 2006.
15. **MapServer.** <http://mapserver.gis.umn.edu/>
16. **Воеводин В., Филамофитский М.** Суперкомпьютер на выходные. Т. 5. Открытые системы. 2003. С. 43–48.
17. **Thain D., Livny M.** Distributed computing in practice: the Condor experience // Concurrency and Computation: Practice and Experience. 2004. Vol. 17. N 2–4. P. 323–356.
18. **Абрамов С., Адамович А., Инюхин А. и др.** Т-система с открытой архитектурой // Суперкомпьютерные системы и приложения / ОИПИ НАН Беларуси. Минск, 2004. 18–22 с.
19. **Kelly S. M., Brightwell R.** Software architecture of the light weight kernel, Catamount: Proc. of the 2005 Cray User Group Annual Technical Conference. May 2005.
20. **Httpperf homepage.** <http://www.hpl.hp.com/research/linux/httpperf/>
21. **Chen Y., Iyer S., Liu X., Milojevic D., Sahai A.** SLA decomposition: translating service level objectives to system level threshold. Palo Alto: HP Labs, 2007.
22. **Dean J., Ghemawat S.** MapReduce: simplified data processing on large clusters: Proc. of the 6th Symposium on Operating System Design and Implementation. San Francisco, 2004.

УДК 004.728.3.057.4

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОНКУРЕНТНОГО ОПРОСА В ШИРОКОПОЛОСНЫХ БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЯХ

С. Д. Андреев,

аспирант

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

А. В. Нилова,

младший инженер

ООО «Scartel Star Lab»

А. М. Тюрликов,

канд. техн. наук, доцент

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Исследуется эффективность механизмов конкурентного опроса абонентов на этапе запроса ресурсов канала в стандарте IEEE 802.16. Доказывается общее утверждение относительно «симметричной» группировки абонентов в системе случайного множественного доступа. Анализируются режимы общего и группового конкурентного опроса, для которых оптимизируется работа усеченного алгоритма двоичной экспоненциальной «отсрочки» при различных настройках системы связи.

Ключевые слова — широкополосные сети, IEEE 802.16, методы резервирования, множественный доступ, алгоритм двоичной экспоненциальной «отсрочки».

Введение

Стандарт IEEE 802.16 [1] специфицирует высокоскоростную систему беспроводной связи, поддерживающую различные мультимедиа-приложения. В иерархии уровней взаимодействия, задаваемой IEEE 802.16, уровень управления доступом к среде (УДС) обслуживает набор профилей физического уровня, каждый из которых задает специфическую среду функционирования. В настоящее время наблюдается общая тенденция становления стандарта IEEE 802.16 как непревзойденной и экономичной технологии, в основном благодаря широкой зоне охвата и продвинутым механизмам качества обслуживания (КЮ) на уровне УДС.

Оценка производительности механизмов IEEE 802.16 стала предметом множества исследовательских работ. В частности, рассматривается процесс передачи абонентом системы специализированного запроса, предназначенного для резервирования части ресурсов канала передачи данных. Детальное описание различных методов такого резервирования предложено в работе [2]. Стандартом предусмотрена возможность использования случайного множественного доступа (СМД) на стадии резервирования канальных ресурсов и усеченного алгоритма двоичной экспоненциальной «отсрочки» (ДЭО) для разреше-

ния возможных конфликтов между передаваемыми запросами.

Асимптотическое функционирование алгоритма ДЭО было подробно рассмотрено в соответствующей литературе. В статье [3] было показано, что алгоритм ДЭО нестабилен в модели с бесконечным числом абонентов. А в работе [4], напротив, для достаточно низких значений интенсивности входного потока утверждается стабильность алгоритма ДЭО в модели с конечным числом абонентов, даже если это число достаточно велико. Такие внешне противоречивые результаты демонстрируют два возможных подхода к анализу любого алгоритма СМД [5]. Первый определяется моделью с бесконечным числом абонентов, которая позволяет получить предельные характеристики функционирования алгоритма СМД. Второй связан с моделью с конечным числом абонентов, которая определяет границы практической работы алгоритма. Исчерпывающее описание обеих моделей может быть найдено в трудах [6] и [7].

Модель как с конечным, так и с бесконечным числом абонентов определяет набор допущений, которые упрощают анализ конкретных алгоритмов СМД. Классической сегодня является система допущений, описанная в статье [8] и в книге [9]. Рассмотрение работы алгоритма ДЭО в рам-

ках классической модели СМД стало предметом обсуждения в работе [10]. В статье [11] для анализа работы алгоритма ДЭО была впервые введена в рассмотрение упрощенная марковская модель.

Помимо непосредственного анализа алгоритма ДЭО важной практической задачей является выработка рекомендаций по его надлежащему использованию в стандарте IEEE 802.16. Для ее решения сначала кратко обсуждаются основные режимы и механизмы IEEE 802.16. Стандартом определены два случая использования алгоритма ДЭО — режим общего и группового опроса абонентов. Отметим, что при групповом опросе все множество абонентов в системе разбивается на группы. Эффективность функционирования общего и группового опроса была подробно изучена в работе [12]. Ряд практических аспектов применения алгоритма ДЭО для чувствительного к задержке трафика рассматривался в статье [13].

В литературе часто приводятся бездоказательные утверждения о росте производительности системы при переходе от общего опроса к групповому (см., например, статьи [12] и [13]), однако в данной работе устанавливается, что выигрыш практически несущественен, если все абоненты обладают одинаковыми требованиями по КО. Для обоснования этого утверждения доказывался тот факт, что в модели с бесконечным числом абонентов их группировка не повышает пропускной способности системы СМД (термин описан в трудах [14] и [15]) в целом.

Авторы также исследуют алгоритм ДЭО в рамках модели с конечным числом абонентов. Строго устанавливается выигрыш, получаемый при использовании общего/группового опроса при различных настройках системы связи.

Обзор стандарта IEEE 802.16

Стандарт IEEE 802.16 специфицирует физический уровень и уровень УДС, а также поддерживает два режима функционирования: обязательный режим «точка-многоточка» и вспомогательный режим «сетка». Уровень УДС, в свою очередь, подразделяется на три иерархических подуровня. С помощью подуровня сопряжения обеспечивает единообразная обработка трафика IP, ATM

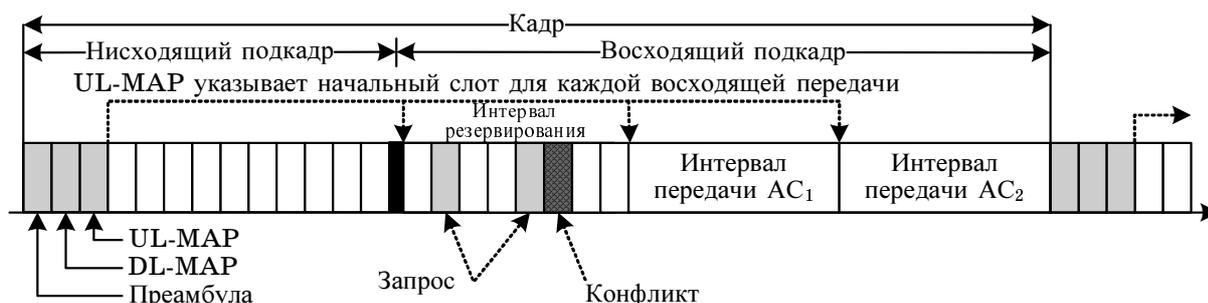
и Ethernet. На едином подуровне УДС определены пять категорий КО, которые позволяют обслуживать трафик, обладающий различными требованиями по КО. Подуровень безопасности осуществляет шифрование пакетов данных и обеспечивает дополнительные криптографические функции.

Базовая архитектура IEEE 802.16 допускает наличие одной базовой станции (БС) и одной или нескольких абонентских станций (АС), которые ниже для краткости именуются просто абонентами. Обмен пакетами данных между абонентами и БС происходит по двум отдельным каналам. В нисходящем канале передается трафик от БС к абонентам, тогда как в восходящем канале поток данных направлен в противоположную сторону. В нисходящем канале отсутствуют выделенные соединения между БС и абонентами, тогда как восходящий канал используется абонентами коллективно, с мультиплексированием активных соединений.

Стандарт IEEE 802.16 определяет два механизма дуплексирования вышеупомянутых каналов — временное (ВД) и частотное (ЧД) дуплексирование. В режиме ВД временной кадр подразделяется на нисходящую и восходящую части. Упрощенно структура УДС-кадра в режиме ВД показана на рис. 1. В режиме ЧД каналы соответствуют непересекающимся полосам частот и, следовательно, не интерферируют между собой.

В нисходящем канале БС осуществляет широковещательную передачу всем абонентам системы. Наряду с пакетами данных БС также передает управляющую информацию о расписании передачи каждого абонента в восходящем канале. Эта информация содержится в специализированном сообщении UL-MAP и используется абонентами для определения момента начала собственной передачи в восходящем канале. Для обеспечения обратной связи абонентов с БС часть ресурса восходящего канала выделяется под так называемый интервал резервирования. В течение этого интервала абоненты передают запросы на резервирование канального ресурса (для краткости — *запросы*), которые затем обрабатываются БС.

Процедуры, регламентирующие передачу абонентов в течение интервала резервирования, мож-



■ Рис. 1. Структура кадра IEEE 802.16 в режиме ВД

но разделить на конкурентные и детерминированные. К последнему типу относится режим непосредственного опроса абонентов, при котором БС предоставляет *возможность передачи* (которая называется в данной работе *слотом*) каждому абоненту для отправки имеющегося у него запроса. К первому типу процедур передачи относятся общий и групповой опросы абонентов. В режиме общего опроса абоненты передают имеющиеся у них запросы, выбирая один из всего множества слотов в кадре. В случае группового опроса абоненты подразделяются на группы, внутри каждой из которых действуют правила общего опроса, но лишь на множестве слотов, отведенных для данной группы. При конкурентном доступе запросов могут возникать так называемые конфликты, которые разрешаются с помощью алгоритма ДЭО. Механизм «piggybacking» позволяет абоненту «прикреплять» имеющийся у него запрос к передаваемому пакету данных, но только после того, как соединение этого абонента с БС было установлено.

Общая модель системы

Для описания особенностей функционирования стандарта IEEE 802.16 видоизменим набор допущений классической модели СМД [8, 9]. Время работы системы разделяется на равные интервалы, длительность каждого из которых соответствует длительности кадра. Кадры нумеруются неотрицательными целыми числами. Предполагается, что в системе функционируют M абонентов. Сформулируем ряд допущений относительно того, как пакеты поступают в систему и передаются.

Допущение 1. В каждый момент времени у каждого абонента имеется одно активное соединение и все соединения принадлежат одному классу КО.

Допущение 2. Каждый кадр содержит K равных конкурентных слотов, предназначенных для передачи запросов. Число K полагается постоянным в течение всего периода времени работы системы.

Допущение 3. В каждом слоте возможно возникновение одного из следующих событий:

- только один из абонентов передает запрос (УСПЕХ);
- ни один из абонентов не передает запрос (ПУСТО);
- два и более абонента передают запросы одновременно, что приводит к искажению всех передаваемых запросов на БС (КОНФЛИКТ).

Допущение 4. Шумы в восходящем канале отсутствуют. Следовательно, БС безошибочно определяет, какое событие происходит в каждом слоте. Если только один абонент осуществляет передачу, БС всегда принимает запрос успешно.

Допущение 5. Механизм «piggybacking» не используется, и для каждого поступающего пакета данных генерируется отдельный запрос. Поскольку ниже речь идет о процессе резервирования канальных ресурсов, можно условно говорить о на-

личии входного потока запросов в рассматриваемую систему. Каждый абонент имеет неограниченную очередь для хранения поступивших запросов.

Допущение 6. Наблюдая активность абонента в кадре $t-1$, БС составляет расписание его передач в восходящем канале для кадра t и транслирует это расписание в нисходящем канале кадра t . БС также сообщает абоненту информацию обратной связи относительно его передач в кадре $t-1$ к началу кадра t .

Допущение 7. Шумы в нисходящем канале отсутствуют. Следовательно, абонент безошибочно принимает как расписание собственных передач, так и информацию обратной связи от БС.

Допущение 8. Введем в рассмотрение случайную величину, равную количеству вновь поступивших запросов к абоненту с номером i в течение кадра t , и обозначим ее как $X_i^{(t)}$. Для всех значений $t \geq 0$ и $i = 1, \dots, M$ случайные величины $X_i^{(t)}$ независимы и одинаково распределены. Предположим также, что к каждому абоненту в течение кадра поступает не более одного запроса, вероятность такого поступления примем за y . Рассматриваемый входной поток запросов подчиняется закону Бернулли. Таким образом, $E[X_i^{(t)}] = y$ для всех $t \geq 0$

и $i = 1, \dots, M$, тогда как $E\left[\sum_{i=1}^M X_i^{(t)}\right] = My \triangleq \Lambda$. Параметр Λ далее называется суммарной *интенсивностью входного потока* на слот.

Подводя итог, отметим, что в соответствии со стандартом IEEE 802.16 каждый абонент практически может устанавливать множество соединений с БС, используя различные заранее оговоренные параметры КО, а один запрос может соответствовать потребностям отдельного соединения или всего множества соединений абонента, что не соответствует допущению 1 напрямую. Однако рассматриваемую модель системы можно обобщить на случай множества соединений, заменив термин «абонент» термином «соединение».

Второе существенное отличие введенной модели допущений от реальной системы состоит в том, что информация обратной связи не сообщается абоненту в явном виде. Абонент ожидает от БС выделения ресурса канала в течение определенного интервала времени, и, если по его истечении ресурс не был выделен, считает передачу запроса неуспешной. Допущение 6 о «немедленной» обратной связи делается в целях упрощения анализа. Все следующие рассуждения могут быть обобщены на случай «отложенной» обратной связи.

Система с бесконечным числом абонентов

Следуя подходу, описанному в работе [5], устремим число абонентов в системе M к бесконечности, а вероятность поступления запроса к абоненту y — к нулю так, чтобы их произведение оставалось постоянным и равным $My = \text{const} = \Lambda$. Тогда

предел суммарного входного процесса, введенного в допущении 8, описывается распределением Пуассона, т. е.

$$\lim_{M \rightarrow \infty} \Pr \left\{ \sum_{j=1}^M X_j^{(t)} = i \right\} = \frac{\Lambda^i}{i!} e^{-\Lambda}.$$

Сформулируем базовые определения такой системы с бесконечным числом абонентов. Для нее рассмотрим возможность функционировать при наличии и при отсутствии потерь пакетов и введем системы с потерями и без потерь соответственно.

Система с потерями пакетов данных

Определение 1. Алгоритмом СМД из класса алгоритмов в системе с потерями $A \in A_{lossy}$ назовем правило, в соответствии с которым абонент, имеющий готовый для передачи запрос, принимает решение о том, передавать ли ему данный запрос в очередном слоте s , отложить его передачу или его отбросить. Если запрос отброшен, соответствующий пакет данных также теряется [16].

Определение 2. Введем в рассмотрение случайную величину $Z^{(t)}$, равную количеству успешных передач запросов в кадре, содержащем K слотов. Очевидно, $Z^{(t)} \in \{0, 1, \dots, K\}$. Рассмотрим также

случайную функцию $\Psi_A(K, \Lambda, s) \triangleq \frac{\sum_{j=0}^s Z^{(t)}}{sK}$. Предел

данного выражения при s , стремящемся к бесконечности, назовем *интенсивностью выходного потока* на слот для алгоритма A в системе с потерями, т. е. $\Psi_A(K, \Lambda) \triangleq \lim_{s \rightarrow \infty} \Psi_A(K, \Lambda, s)$.

Определение 3. Пропускной способностью алгоритма A в системе с потерями назовем верхнюю грань интенсивностей выходного потока по всему множеству значений интенсивности входного потока, что дает

$$T_A(K) \triangleq \sup_{\Lambda} \Psi_A(K, \Lambda). \quad (1)$$

Определение 4. Пропускной способностью системы с потерями назовем верхнюю грань пропускных способностей алгоритмов, принадлежащих классу $A_{lossy}(K)$ алгоритмов СМД, при наличии K слотов в кадре:

$$C_{lossy}(K) \triangleq \sup_{A \in A_{lossy}(K)} T_A(K). \quad (2)$$

Отметим, что пропускная способность алгоритма характеризует работу отдельного алгоритма СМД в системе с потерями, тогда как пропускная способность системы является предельной характеристикой системы с потерями в целом.

Система без потерь пакетов данных

Определение 5. Алгоритмом СМД из класса алгоритмов в системе без потерь $A \in A_{lossless}$ назовем

правило, в соответствии с которым абонент, имеющий готовый для передачи запрос, принимает решение о том, передавать ли ему данный запрос в очередном слоте s или отложить его передачу. Отметим, что запросы при этом не отбрасываются, следовательно, потерь пакетов данных не происходит.

Определение 6. Задержкой передачи запроса $\delta_A(K, \Lambda)$ назовем случайную величину, равную интервалу времени от момента поступления запроса в систему до момента окончания его успешной передачи. Введем в систему новый запрос в некотором слоте s и обозначим его задержку как $\delta_A^{(s)}(K, \Lambda)$.

Определение 7. Среднюю задержку запроса (названную средней виртуальной задержкой [7]) определим как

$$D_A(K, \Lambda) \triangleq \limsup_{s \rightarrow \infty} E[\delta_A^{(s)}(K, \Lambda)]. \quad (3)$$

Определение 8. Скоростью передачи алгоритма A в системе без потерь назовем верхнюю грань интенсивностей выходного потока, для которых алгоритм обеспечивает конечную среднюю задержку запроса:

$$R_A(K) \triangleq \sup\{\Lambda : D_A(K, \Lambda) < \infty\}. \quad (4)$$

Определение 9. Пропускной способностью системы без потерь назовем верхнюю грань пропускных способностей алгоритмов, принадлежащих классу $A_{lossless}(K)$ алгоритмов СМД, при наличии K слотов в кадре:

$$C_{lossless}(K) \triangleq \sup_{A \in A_{lossless}(K)} R_A(K). \quad (5)$$

Точное значение пропускной способности системы без потерь в настоящее время неизвестно. Важная верхняя граница для пропускной способности $C_{lossless}(1)$ была установлена в работе [14] и составила $C_{lossless}(1) = 0,587$. Позднее она была несколько улучшена. Лучший на сегодняшний день алгоритм СМД, алгоритм «дробления», был предложен в статье [17] и имеет скорость передачи $R_{pt} = 0,487$. В последующие годы он также был незначительно улучшен, но основная его идея осталась неизменной.

По аналогии отметим, что скорость алгоритма характеризует работу отдельного алгоритма СМД в системе без потерь, тогда как пропускная способность системы является предельной характеристикой системы без потерь в целом.

Анализ «симметричной» группировки абонентов

Докажем утверждение, что группировка абонентов не повышает значение пропускной способности системы (ее предельной характеристики функционирования). Все приведенные рассуждения могут быть одинаковым образом сформулированы как для системы с потерями, так и для системы без потерь. Доказательство представлено на примере системы без потерь, но нижний индекс

«lossless» у параметров A и C опущен для упрощения обозначений.

1. Рассмотрим вначале систему СМД при отсутствии разбиения времени на кадры. При этом будем считать, что время ее работы поделено на слоты одинаковой длительности и абонент может начинать передачу запроса только в начале очередного слота. Алгоритм СМД из класса алгоритмов в системе со слотами $A \in A_{slotted}$ может быть снова определен как правило, в соответствии с которым абонент, имеющий готовый для передачи запрос, принимает решение о том, передавать ему данный запрос в следующем слоте s или нет. Информация обратной связи доступна абоненту к началу следующего слота $s + 1$.

2. Теперь дополнительно разобьем время работы системы на кадры, каждый из которых состоит из целого и постоянного числа слотов K . При этом информация обратной связи по-прежнему доступна абоненту к началу следующего за передачей слота. Допустим, что все абоненты наблюдают события, происходящие в системе, с момента начала ее функционирования. Таким образом, все абоненты определяют ситуацию, произошедшую в каждом слоте, одинаковым образом, и дополнительное разбиение на кадры не влияет на производительность системы. Можно сделать вывод, что множество всех алгоритмов СМД для данной системы A_{framed} совпадает с множеством всех алгоритмов СМД для системы со слотами, т. е. $A_{framed} = A_{slotted} \triangleq A(1)$. По аналогии с определением 9 выразим пропускную способность такой системы с кадрами как $C(1) \triangleq \sup_{A \in A(1)} R_A(1)$.

3. Изменим теперь характер доступности информации обратной связи в системе с кадрами, связав моменты ее получения с началами кадров, т. е. единожды за K слотов. Одна из альтернатив рассматриваемой системы с «отложенной» обратной связью анализировалась в работе [18]. Определим алгоритм СМД из класса алгоритмов в системе с «отложенной» обратной связью $A \in A(K)$, как и выше, делая вывод, что ограничение доступности информации обратной связи сужает множество алгоритмов СМД в данной системе по сравнению с соответствующим множеством в системе с кадрами, что дает $A(K) \subset A(1)$. Из вышеизложенного и двух определений пропускной способности $C(1)$ и $C(K)$ (5) немедленно следует $C(K) \leq C(1)$.

4. Любому алгоритму A из множества алгоритмов $A(1)$ может быть поставлен в соответствие алгоритм A^* из множества $A(K)$ так, чтобы $R_{A^*} = R_A$. Для этого достаточно «разбить» все множество абонентов в системе с «отложенной» обратной связью на K равных и непересекающихся групп («симметрично») и закрепить за каждой из групп один слот в каждом кадре. В системе с бесконечным числом абонентов разбиение на группы может, например, происходить следующим образом.

Новому абоненту, к которому поступил готовый для передачи запрос, номер группы назначается случайным образом равномерно в диапазоне $[1, K]$. Далее, к примеру, группа с номером один наблюдает и использует для передачи запросов исключительно первый слот в каждом кадре, группа с номером два — второй и т. д. Таким образом, для каждой из групп информация обратной связи доступна к началу следующего «своего» слота, что в точности соответствует работе системы со слотами.

5. Из определения пропускной способности и вышеизложенного (см. п. 3, 4) следует, что $C(1) = C(K)$, т. е. пропускная способность системы с кадрами не изменяется при введении «отложенной» обратной связи. Более того, в случае, когда абоненты системы заранее поделены на равные группы, для каждой из которых отведено по L слотов в кадре, пропускная способность системы также не изменяется, т. е. $C(1) = C(L) = C(K)$. Можно сделать вывод, что «симметричная» группировка абонентов не влияет на пропускную способность системы СМД с бесконечным числом абонентов.

Система с конечным числом абонентов

Рассмотрим эффективность конкурентного опроса конечного числа M абонентов в рамках общей модели системы. Множество рассматриваемых алгоритмов СМД сужается до одного алгоритма, который специфицирован в стандарте IEEE 802.16. Напомним, что этот алгоритм носит название двоичной экспоненциальной «отсрочки», и его правила могут быть сформулированы следующим образом.

Усеченный алгоритм двоичной экспоненциальной «отсрочки»

Правило 1.1. Если новый запрос поступает к абоненту в кадре $t-1$ и у данного абонента отсутствуют другие готовые для передачи запросы, он передает этот запрос в кадре t (попытка передачи). При этом слот для передачи данного запроса выбирается по равномерному закону из всего множества слотов, предназначенных для той группы, к которой принадлежит рассматриваемый абонент. Отметим, что при общем опросе абонент выбирает слот для передачи из всего множества слотов K в кадре t , тогда как при групповом опросе возможность выбора сужается до L слотов.

Правило 1.2. Если запрос готов к повторной передаче с номером i ($i > 0$) в начале кадра t , то абонент выбирает число (счетчик «отсрочки») равномерно в диапазоне $\{0, 1, \dots, 2^{\min(m, i)}W - 1\}$, где переменные W и m представляют собой параметры алгоритма ДЭО, называемые начальным окном «отсрочки» и максимальной степенью «отсрочки» соответственно, а переменная i равна числу конфликтов, в которые вступил рассматриваемый запрос к началу кадра t . Далее абонент откладывает

вает передачу запроса на выбранное число слотов, учитывая только слоты, отведенные для «своей» группы.

Правило 2.1. Если после получения информации обратной связи от БС абонент определяет, что последняя (повторная) передача текущего запроса закончилась КОНФЛИКТОМ, он увеличивает счетчик произошедших конфликтов i для данного запроса. Если значение этого счетчика совпадает с максимальным числом повторных передач Q , тогда запрос вместе с соответствующим ему пакетом данных отбрасывается, а счетчик конфликтов обнуляется: $i = 0$.

Правило 2.2. Если после получения информации обратной связи от БС абонент определяет, что последняя (повторная) передача текущего запроса закончилась УСПЕХОМ, счетчик конфликтов также обнуляется: $i = 0$.

Система без повторных передач пакетов данных

Вычислим пропускную способность алгоритма ДЭО для случая минимально возможной задержки. Такой сценарий использования алгоритма практически оправдан при передаче чувствительного к задержке трафика (например, голосового потока VoIP [13]). Для минимизации средней задержки как для общего, так и для группового опроса максимальное число повторных передач устанавливается равным своему наименьшему значению, т. е. $Q = 0$. Таким образом, соответствующее значение пропускной способности алгоритма ДЭО обозначается как $T_{БЕВ}^1$, где 1 означает единственную попытку передачи.

Напомним, что в соответствии с допущением 8 о входном потоке Бернулли параметр y представляет собой вероятность поступления к абоненту запроса в кадре. Отметим также, что стандарт не определяет никаких соотношений между параметрами W , m и K . К примеру, если $W < L$ для группового опроса, тогда при первой попытке повторной передачи некоторые слоты никогда не будут задействованы. По этой причине разумно установить

$W = \frac{lK}{G} = lL$, где l — некоторое натуральное число ($l \geq 1$), а G — число групп. Такой выбор величины W позволяет распределить попытки повторной передачи равномерно среди числа слотов, доступных каждой группе. В рассматриваемом случае при отсутствии повторных передач $l = 1$ и $m = 0$.

Искомое значение пропускной способности алгоритма ДЭО на слот $T_{БЕВ}^1$, которое достигается передачами запросов в конкурентных слотах для общего ($G = 1$) и группового ($G > 1$) опроса абонентов, можно вычислить, следуя подходу из работы [19] и используя громоздкое рекуррентное выражение. Покажем упрощенный способ вычисления данной величины с помощью следующих рассуждений, близких к рассуждениям в статье [20].

В каждом слоте может быть передано не более одного запроса. Введем в рассмотрение случайную величину $Z^{(i)}$, которая принимает значение 1 в случае УСПЕХА в слоте i и 0 — во всех остальных случаях. Отметим, что поскольку число абонентов в каждой группе постоянно и все группы независимы, достаточно вычислить математическое ожидание суммы $Z^{(i)}$ по всем слотам L только лишь для одной группы. Очевидно, что данное математическое ожидание и будет представлять собой искомое значение пропускной способности $T_{БЕВ}^1$, т. е.

$$T_{БЕВ}^1 = \frac{E \left[\sum_{i=1}^L Z^{(i)} \right]}{L} = E[Z^{(i)}]. \quad (6)$$

Математическое ожидание случайной величины $Z^{(i)}$ имеет смысл вероятности УСПЕХА в слоте, который наступает тогда и только тогда, когда один из N абонентов в группе выбирает данный слот для передачи запроса, что дает

$$T_{БЕВ}^1 = E[Z^{(i)}] = \Pr\{Z^{(i)} = 1\} = \frac{yN}{L} \left(1 - \frac{y}{L}\right)^{N-1}. \quad (7)$$

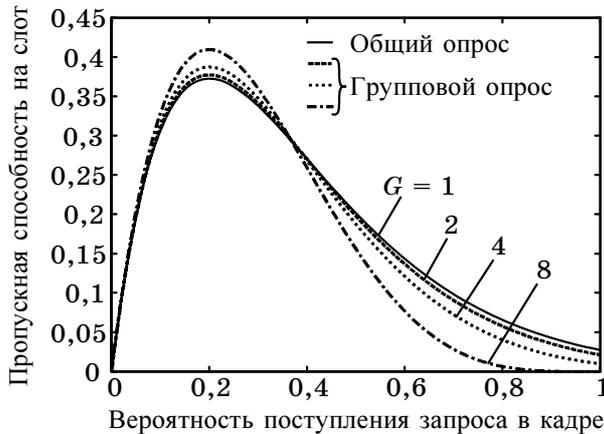
Далее можно установить «оптимальное» значение вероятности поступления запроса y , при котором достигается наибольшее значение пропускной способности. Для этого вычислим первую производную от выражения (7) по переменной y и приравняем ее к нулю:

$$y_0 = \frac{L}{N}. \quad (8)$$

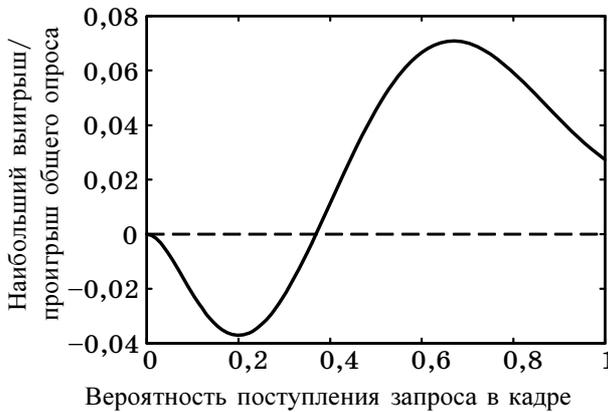
Функция $T_{БЕВ}^1$ для различного числа групп в системе G с $K = 8$ и $M = 40$ изображена на рис. 2. Наблюдается преимущество группового опроса перед общим для малых значений y , тогда как для средних и больших значений y ситуация меняется на противоположную. Также можно отметить, что зазор между случаями $G = 1$ и $G = 8$ демонстрирует наиболее существенную разницу среди всех возможных группировок. На рис. 3 изображена такая зависимость выигрыша/проигрыша при использовании группировки абонентов от вероятности поступления запроса y . Выражение для данной функции можно получить следующим образом:

$$f(y) = \frac{yM}{K} \left(1 - \frac{y}{K}\right)^{M-1} - \frac{yN}{L} \left(1 - \frac{y}{L}\right)^{N-1}. \quad (9)$$

Можно сделать вывод, что, несмотря на наличие колебаний функции (9) при групповом и общем опросе абонентов, максимально возможный выигрыш/проигрыш незначителен по сравнению с абсолютным значением пропускной способности. Следовательно, в рассматриваемом случае минимально возможной средней задержки ($Q = 0$) раз-



■ Рис. 2. Эффективность конкурентного опроса при отсутствии повторных передач



■ Рис. 3. Наибольший выигрыш/проигрыш общего опроса

биение абонентов на группы нецелесообразно, поскольку выигрыш несущественен и, кроме того, с ростом числа групп увеличиваются накладные расходы IEEE 802.16 [1].

Система без потерь пакетов данных

Продолжим анализ производительности системы с конечным числом абонентов M в рамках ряда допущений, сформулированных в общей модели. Устремим максимальное число повторных передач Q к бесконечности. При этом потери запросов не возникает, и, соответственно, потеря пакетов данных в системе также исключена. Важной характеристикой такой системы без потерь является скорость алгоритма ДЭО $R_{БЕВ}$.

Вычислим скорость алгоритма ДЭО, функционирующего в режиме насыщения, т. е. в условиях, когда каждый абонент всегда имеет готовый для передачи запрос.

В настоящее время для анализа алгоритма ДЭО в насыщении часто вводится набор допущений [11], который позволяет свести рассмотрение работы системы в целом к рассмотрению функционирования отдельного (меченого) абонента. Для некоторого слота в кадре вычисляются две вероятности: вероятность (повторной) передачи запроса меченым абонентом (p_r) и условная вероятность возникновения конфликта при условии передачи запроса меченым абонен-

том (p_c). Эти вероятности полагаются постоянными все время работы системы, а попытки передачи запроса меченым абонентом — статистически независимыми.

Введем в рассмотрение случайную величину $Z^{(i)}$, которая принимает значение 1 в случае передачи меченым абонентом запроса в слоте i и 0 — в противном случае. С учетом введенных выше допущений моменты времени, связанные с получением обратной связи на успешную передачу запроса от меченого абонента, являются точками регенерации стохастического процесса, задаваемого последовательностью $Z^{(i)}$.

Напомним, что точки регенерации совпадают с моментами начала соответствующих кадров, а кадр содержит K конкурентных слотов. Величина p_t может быть

$$p_t = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^n B^{(i)}}{\sum_{i=1}^n D^{(i)}},$$

где $B^{(i)}$ — количество передач запроса в цикле регенерации с номером i ; $D^{(i)}$ — длительность цикла регенерации с номером i , выраженная в слотах. Из теории регенерирующих процессов [22] известно:

$$p_t = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^n B^{(i)}}{\sum_{i=1}^n D^{(i)}} = \frac{E[B]}{E[D]}. \quad (10)$$

Поскольку конфликт возникает, если как минимум один из оставшихся $M-1$ абонентов (повторно) передает свой запрос, то величина

$$p_c = 1 - (1 - p_t)^{M-1}. \quad (11)$$

Величина B подчиняется геометрическому распределению с параметром $1 - p_c$, что можно записать как

$$E[B] = \sum_{i=1}^{\infty} i \Pr\{B=i\} = (1 - p_c) \sum_{i=1}^{\infty} i p_c^{i-1} = \frac{1}{1 - p_c}. \quad (12)$$

Математическое ожидание длительности цикла регенерации D можно аналогично записать как

$$E[D] = \sum_{i=1}^{\infty} D(i) \Pr\{B=i\} = (1 - p_c) \sum_{i=1}^{\infty} D(i) p_c^{i-1}, \quad (13)$$

где $D(i)$ — длительность цикла регенерации при условии, что было сделано точно i попыток передачи запроса. Можно легко показать справедливость следующих соотношений для величины $D(i)$:

$$D(i) = \begin{cases} 2^{i-1}W - \frac{W-iK}{2}, & 1 \leq i \leq m+1; \\ 2^{m-1}W(i-m+1) - \frac{W-iK}{2}, & i > m+1. \end{cases} \quad (14)$$

Для вычисления искомой вероятности (повторной) передачи абонента p_t в случайно выбранном слоте воспользуемся выражением (10). Здесь $E[B]$ следует из (12), а $E[D]$ может быть получено из (13) с учетом (14), что в итоге дает

$$p_t = \frac{2(1-2p_c)}{(1-2p_c)(W+K) + p_c W(1-(2p_c)^m)}. \quad (15)$$

Выражения (11) и (15) представляют собой нелинейную систему уравнений с двумя неизвестными p_c и p_t , которая может быть решена численно. Наконец, значение $R_{БЕВ}$ задается вероятностью единственной (повторной) передачи в слоте:

$$R_{БЕВ} = Mp_t(1-p_t)^{M-1}. \quad (16)$$

Продемонстрированный выше подход позволяет получить оптимальное значение вероятности (повторной) передачи, которое приводит к максимизации скорости алгоритма ДЭО для всех возможных пар его параметров (W, m). Можно показать, что максимальная скорость алгоритма достигается, когда $m = 0$. Ниже рассмотрим оптимальную систему подробнее.

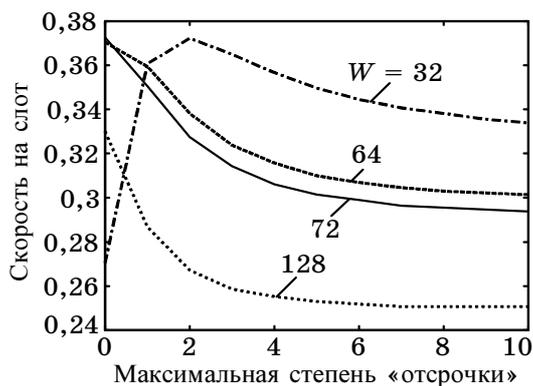
Подставляя $m = 0$ в (15), можно установить, что $p_t = \frac{2}{W_0 + K}$, где W_0 представляет собой оптимальное значение начального окна «отсрочки».

Заметим, что выражение (16) схоже с выражением (7), которое достигает максимального значения при $\frac{yN}{L} = 1$. Аналогично выражение (15) достигает максимума при $Mp_t = \frac{2M}{W_0 + K} = 1$.

Наконец, W_0 может быть вычислено как $2M - K$ или, с учетом возможной группировки абонентов:

$$W_0 = 2N - L. \quad (17)$$

Следует подчеркнуть, что значение скорости оптимизированного алгоритма ДЭО с W_0 и $m = 0$ в точности совпадает с максимальным значением (7) в системе с поте-



■ Рис. 4. Эффективность общего опроса при неограниченном числе повторных передач

рями. Однако использование оптимального начального окна «отсрочки» W_0 в стандарте IEEE 802.16 затруднено, поскольку это значение может не являться целой степенью числа 2. В качестве примера на рис. 4 изображен ряд зависимостей скорости алгоритма ДЭО от различных пар значений W и m . Заметим, что для общего опроса в рассматриваемом примере с $M = 40$ и $K = 8$ W_0 составляет 72. При этом скорость алгоритма ДЭО с параметрами $W = 32$ и $m = 2$ лишь незначительно уступает максимально возможной, следовательно, система передачи с такими параметрами будет подоптимальной.

Система с потерями пакетов данных и практические замечания

Предложенный выше упрощенный аналитический подход к расчету скорости алгоритма ДЭО в системе без потерь пакетов данных может быть несложно обобщен для расчета его пропускной способности. Напомним, что пропускная способность алгоритма ДЭО является его важнейшей характеристикой в системе с потерями пакетов данных, т. е. при наличии ограничения на число повторных передач соответствующего запроса. Снова введем в рассмотрение величину Q , равную максимальному числу повторных передач одного запроса. Тогда максимальное количество передач запроса составит $Q + 1$, а выражение (15) может быть обобщено следующим образом:

$$p_t = \begin{cases} \frac{2(1-2p_c)(1-p_c^{Q+1})}{W(1-p_c)(1-(2p_c)^{Q+1}) + K(1-2p_c)(1-p_c^{Q+1})}, & Q \leq m; \\ \frac{2(1-2p_c)(1-p_c^{Q+1})}{(1-2p_c)(W(1-2^m p_c^{Q+1}) + K(1-p_c^{Q+1})) + p_c W(1-(2p_c)^m)}, & Q > m. \end{cases} \quad (18)$$

Выражения (11) и (18) по-прежнему представляют собой нелинейную систему уравнений с двумя неизвестными p_c и p_t , которая может быть решена численно. Далее, по аналогии с (16), пропускная способность насыщения вычисляется как

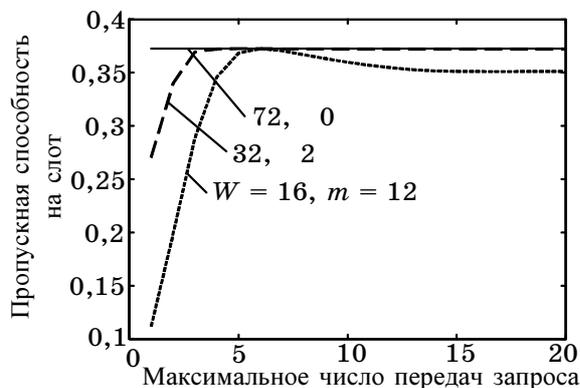
$$T_{БЕВ}^{Q+1} = Mp_t(1-p_t)^{M-1}. \quad (19)$$

Зависимость пропускной способности насыщения от максимального числа передач запроса ($Q + 1$) для общего опроса с $M = 40$ и $K = 8$ показана на рис. 5. Видно, что для оптимальной системы с $W_0 = 72$ и $m = 0$ пропускная способность не зависит от максимального числа передач, и, таким образом, ее скорость равна пропускной способности. Напротив, для подоптимальной системы с $W = 32$ и $m = 2$ (см. рис. 4) такая зависимость имеет место.

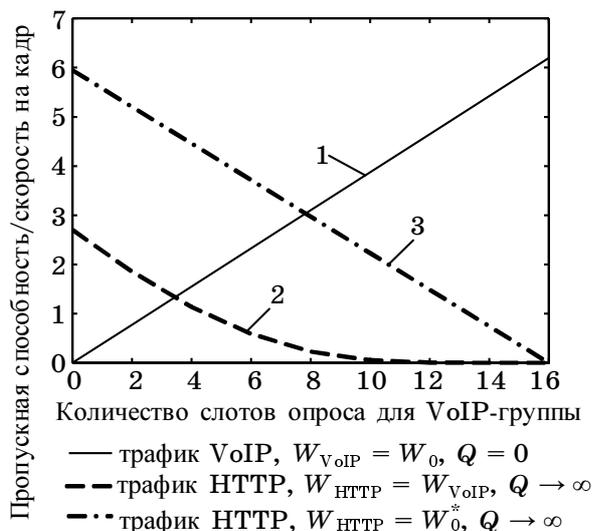
Выше было показано, что в пределе при $Q \rightarrow \infty$ подоптимальная система лишь незначительно уступает оптимальной с точки зрения скорости передачи. На рис. 5 можно заметить, что при $Q = 4$ имеется максимум пропускной способности для подоптимальной системы, который в точности совпадает со скоростью для оптимальной системы. Таким образом, существует значение величины Q , при котором удастся достичь пропускной способности, не уступающей скорости в системе без потерь.

Все рассуждения данного раздела могут быть обобщены на случай «несимметричной» группировки абонентов с различными требованиями КО. Рассмотрим реальный пример, при котором $N_1 = 10$ абонентов первой группы генерируют VoIP-трафик, а $N_2 = 50$ абонентов второй группы — HTTP-трафик. Для первой группы, следуя за статьей [13] и учитывая характер трафика, установим ограничение на число повторных передач ($Q = 0$), а для второй группы снимем данное ограничение ($Q \rightarrow \infty$). Очень важно заметить, что в текущей версии стандарта IEEE 802.16 [1] параметры алгоритма ДЭО (значения W и m) рассылаются от БС к абонентам в широкополосном режиме, т. е. задать различные параметры алгоритма каждой группе опрашиваемых абонентов невозможно.

На практике можно ожидать, что первая группа абонентов будет обладать более высоким приоритетом в силу чувствительности VoIP-трафика к задержкам при передаче. Следовательно, общие для обеих групп параметры алгоритма ДЭО будут оптимизированы именно для этой группы ($W = W_0$ и $m = 0$). На рис. 6 линия 1 показывает пропуск-



■ Рис. 5. Эффективность общего опроса при ограничении на число повторных передач



■ Рис. 6. Эффективность группового опроса при «несимметричной» группировке абонентов

ную способность на кадр для первой группы абонентов, если из общего числа конкурентных слотов опроса в кадре ($K = 16$) L_1 доступны первой группе, а $L_2 = K - L_1$ — второй. Пропускная способность и скорость алгоритма ДЭО указаны в расчете на кадр, а не на слот. Это позволяет нагляднее изобразить обменное соотношение между эффективностями опроса рассматриваемых групп абонентов в системе с «несимметричной» группировкой.

Снова подчеркнем, что при оптимизации алгоритма ДЭО для VoIP-трафика абоненты, генерирующие HTTP-трафик, будут использовать те же самые параметры алгоритма, что приведет к существенному снижению скорости алгоритма ДЭО для второй группы (линия 2). Можно предложить следующее несложное улучшение стандарта, при котором каждой из групп абонентов устанавливаются собственные параметры алгоритма ДЭО. Тогда для второй группы можно оптимизировать работу алгоритма независимо от первой и установить «свои» оптимальные параметры ($W = W_0^*$). При этом скорость алгоритма ДЭО (линия 3) для второй группы абонентов существенно возрастает.

Заключение

В данной работе была рассмотрена «симметричная» группировка в системе с бесконечным числом абонентов и показано, что пропускная способность системы СМД при этом не изменяется. Формально введены в рассмотрение системы с конечным числом абонентов с потерями пакетов данных и без таковых, в рамках которых исследовано функционирование алгоритма ДЭО. Используемый упрощенный аналитический расчет пропускной способности (скорости) алгоритма ДЭО позволяет провести оптимизацию его работы в стандарте IEEE 802.16. Кроме того, предложено важное улучшение стан-

дарт, которое позволяет достичь более высоких показателей пропускной способности (скорости).

По результатам работы можно сделать вывод, что преимущество группового опроса перед общим опросом абонентов при «симметричной» группировке незначительно. Заметим, однако, что для поддержания требований качества обслуживания может быть использована «несимметричная» группировка абонентов: с неравным размером групп

(количеством конкурентных слотов опроса на группу) и различными ограничениями на число попыток передачи запроса. В текущей версии стандарта IEEE 802.16 такая группировка неизбежно приводит к «угнетению» низкоприоритетных групп абонентов, которого, тем не менее, можно избежать, предоставив возможность отдельной оптимизации параметров алгоритма ДЭО указанным в работе способом.

Литература

1. IEEE Std 802.16e-2005, Piscataway, NJ, USA, December 2005.
2. Rubin I. Access-control disciplines for multi-access communication channels: Reservation and TDMA schemes // IEEE Transactions on Information Theory. 1979. Vol. 25. N 5. P. 516–536.
3. Aldous D. Ultimate instability of exponential back-off protocol for acknowledgment based transmission control of random access communication channels // IEEE Transactions on Information Theory. 1987. Vol. 33. N 2. P. 219–233.
4. Goodman J., Greenberg A., Madras N., March P. Stability of binary exponential backoff // Journal of the ACM. 1988. Vol. 35. N 3. P. 579–602.
5. Paterakis M., Georgiadis L., Papantoni-Kazakos P. On the relation between the finite and the infinite population models for a class of RAA's // IEEE Transactions on Communications. 1987. Vol. 35. P. 1239–1240.
6. Chlebus B. Handbook of Randomized Computing, volume 1, chapter Randomized Communication in Radio Networks, pages 401–456. P. Pardalos, S. Rajasekaran, J. Reif, and J. Rolim, 2001.
7. Tsybakov B. Survey of USSR contributions to random multiple-access communications // IEEE Transactions on Information Theory. 1985. Vol. 31. N 2. P. 143–165.
8. Tsybakov B., Mikhailov V. Free synchronous packet access in a broadcast channel with feedback // Problems of Information Transmission. 1978. Vol. 14. N 4. P. 259–280.
9. Bertsekas D., Gallager R. Data Networks. Prentice Hall, 1992.
10. Song N., Kwak B., Miller L. On the stability of exponential backoff // Journal Research of NIST. 2003. Vol. 108. P. 289–297.
11. Bianchi G. Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 2000. Vol. 18. N 3. P. 535–547.
12. Lin L., Jia W., Lu W. Performance analysis of IEEE 802.16 multicast and broadcast polling based bandwidth request // IEEE Wireless Communications and Networking Conference. 2007. Vol. 1. P. 1854–1859.
13. Alanen O. Multicast polling and efficient VoIP connections in IEEE 802.16 networks // 10th ACM Symposium on Modeling, analysis, and simulation of wireless and mobile systems. 2007. Vol. 1. P. 289–295.
14. Tsybakov B., Likhanov N. Upper bound on the capacity of a random multiple access system // Problems of Information Transmission. 1987. Vol. 23. N 3. P. 224–236.
15. Turlikov A., Vinel A. Capacity estimation of centralized reservation-based random multiple-access system // Symposium on Problems of Redundancy in Information and Control Systems. 2007. Vol. 1. P. 154–160.
16. Tsybakov B. One stochastic process and its application to multiple access in supercritical region // IEEE Transactions on Information Theory. 2001. Vol. 47. N 4. P. 1561–1569.
17. Tsybakov B., Mikhailov V. Random multiple packet access: Part-and-try algorithm // Problems of Information Transmission. 1980. Vol. 16. N 4. P. 305–317.
18. Tsybakov B., Berkovskii M. Multiple access with reservation // Problems of Information Transmission. 1980. Vol. 16. N 1. P. 35–54.
19. Vinel A., Zhang Y., Ni Q., Lyakhov A. Efficient request mechanisms usage in IEEE 802.16 // IEEE Global Telecommunications Conference. 2006. Vol. 1. P. 1–5.
20. Abramson N. The throughput of packet broadcasting channels // IEEE Transactions on Communications. 1977. Vol. 25. N 1. P. 117–128.
21. Vinel A., Zhang Y., Lott M., Tiurlikov A. Performance analysis of the random access in IEEE 802.16 // IEEE 16th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. 2005. Vol. 3. P. 1596–1600.
22. Merakos L., Bisdikian C. Delay analysis of the n-ary stack random-access algorithm // IEEE Transactions on Information Theory. 1988. Vol. 34. N 5. P. 931–942.

УДК 519.872

АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ СКОРОСТЯМИ ЛОГИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ В КАНАЛЕ РАДИОСВЯЗИ МНОЖЕСТВЕННОГО ДОСТУПА

С. И. Макаренко,

канд. техн. наук

Ставропольское высшее военное авиационное инженерное училище (военный институт) им. маршала авиации В. А. Судца

Приведена методика повышения показателей качества обслуживания сети специального назначения за счет адаптивного управления скоростями логических соединений в сети воздушной радиосвязи, использующей CSMA-метод доступа.

Ключевые слова — информационно-вычислительные сети, системы массового обслуживания, квазистационарный поток заявок на обслуживание, эффективность управления авиационными комплексами.

Введение

В настоящее время в информационно-вычислительных сетях, образующих информационную подсистему автоматизированной системы управления (АСУ), процесс информационного обмена на канальном уровне эталонной модели взаимодействия открытых систем (ЭМВОС) представляется в виде модели математических схем систем массового обслуживания (СМО). При этом информационные потоки по логическим соединениям (ЛС) представляются стационарным пуассоновским потоком, а среда передачи — каналом радиосвязи множественного доступа (КМД) [1].

Однако представление реальных информационных потоков стационарной моделью существенно влияет на точность получаемых результатов. Исследования [2–4] показали, что в большей степени данное влияние проявляется при расчете параметров сети информационного обеспечения АСУ реального времени, в частности, параметров сети связи АСУ авиационными комплексами перехвата (АКП).

Порядок ретрансляции сообщений в сети воздушной радиосвязи (СВРС) определяется алгоритмом случайного многостанционного доступа (АСМСД), который представляется моделью СМО «ненастойчивый множественный доступ с проверкой несущей» [1, 5]. Проведенный анализ информационного обмена телекодированной информацией между пунктом управления и АКП в СВРС [2, 3, 5] показал, что реальный входной поток, поступающий на вход КМД, значительно отличается от

стационарного. Интенсивность информационного обмена может существенно меняться в зависимости от тактической обстановки в районе боевых действий и типа решаемой боевой задачи. В общем виде входной поток имеет две сопоставимые по уровню составляющие: нестационарную (данные тактической обстановки, информационное обеспечение боевых действий) и стационарную (циклические запросы о параметрах полета, команды управления и др.). Моделирование КМД моделью СМО «ненастойчивый множественный доступ с проверкой несущей» позволяет определить время задержки пакета как функцию от интенсивности информационного обмена λ [1]:

$$T_3 = \frac{D_{\text{mes}}}{C} \left[\left(\frac{\lambda}{SC} - 1 \right) \left(2 \frac{d_{\text{max}} C}{c D_{\text{mes}}} + 1 + K \right) + 1 + \frac{d_{\text{max}} C}{c D_{\text{mes}}} \right], \quad (1)$$

где $S = \frac{(\lambda e^{-(\lambda d_{\text{max}}/c D_{\text{mes}})})}{(\lambda(1+2(d_{\text{max}} C/c D_{\text{mes}})) + C e^{-(\lambda d_{\text{max}}/c D_{\text{mes}})})}$; D_{mes} —

объем пакета; C — пропускная способность канала связи (КС); d_{max} — радиус сети; c — скорость распространения электромагнитных волн; K — количество повторов сообщения в случае ошибки при отправке.

Анализ ошибок в определении времени доставки сообщений показал, что представление потока информационного обмена в стационарном виде (без введения в модель сети элементов, учитывающих

нестационарную составляющую входного потока) при одиночном наведении АК ведет к ошибке в определении задержки сообщений на отдельных этапах выполнения боевого задания.

Вероятность наземного наведения АКП:

$$P_{н.н} = \frac{1}{2} \left[\Phi \left(\frac{T_n(m_Q + \Delta Q_{доп})}{2T_3} \right) - \Phi \left(\frac{T_n(m_Q - \Delta Q_{доп})}{2T_3} \right) \right], \quad (2)$$

где T_n — дискретность выдачи управляющих воздействий на АКП; m_Q — математическое ожидание маневра цели по курсу; $\Delta Q_{доп}$ — допустимые ошибки по курсу, исправляемые АКП в процессе самонаведения.

Поскольку вероятность наведения АКП $P_{н.н}$ прямо зависит от задержек сообщений управления, то это ведет к ошибке в определении вероятности наведения, возрастающей при увеличении числа управляемых АКП [6].

Таким образом, противоречие между реальными потоками данных в КМД, имеющими нестационарную интенсивность, и моделью КМД как СМО со стационарным входным потоком ведет к ошибкам в определении времени доставки сообщений и, как следствие, к снижению вероятности наведения. В интересах поддержания вероятности наведения АКП на заданном уровне ($P_{н.н.з}$) необходимо обеспечить перераспределение скоростей M ЛС, входящих в состав КМД, в начале каждого цикла управления. При этом каждое из ЛС в составе КМД принадлежит каналу наведения соответствующего АКП. Таким образом, для компенсации влияния нестационарности информационного обмена на процесс наведения АКП необходимо создание адаптивной к нестационарному потоку методики управления ресурсами СВРС.

Постановка научной задачи

В формализованном виде задачу поддержания вероятности наведения АКП на заданном уровне можно представить как минимизацию скорости каждого m -го ЛС C_m в КМД при векторе условий на варьируемые параметры V , векторе ограничений R , векторе граничных условий G и векторе неопределенных случайных возмущений E в зависимости от интенсивности входного потока λ_m , заданной вероятности наведения АКП $P_{н.н.з}$ и параметров сети $D_{мес}$, d_{max} , K :

$$\min_{(V, R, G, E)} C_m(\lambda_m, P_{н.н.з}, D_{мес}, d_{max}, K). \quad (3)$$

Вектор варьируемых параметров V определяется диапазоном изменения интенсивностей информационного обмена в m -х КС за период выполнения M АКП своих боевых заданий:

$$V = \begin{cases} \lambda \neq \text{const} | T_{набл} \\ T_{набл} \in [0, T_{навАК}] \end{cases}. \quad (4)$$

Вектор G задает граничные условия значений интенсивности $\lambda(t)$ (разрыв 1-го рода функции $\lambda(t)$) при переходе от $(i-1)$ -го цикла управления к i -му в момент t_i . Вектор G зависит от двух составляющих интенсивности информационного обмена — нестационарной $\lambda_{var}(t)$ и стационарной $\lambda_{det}(t)$:

$$G = \begin{cases} \lim_{t \rightarrow (t_i-0)} \lambda(t) - \lim_{t \rightarrow (t_i+0)} \lambda(t) = \Delta\lambda(t_i) \\ \Delta\lambda(t_i) = \Delta\lambda_{det}(t_i) + \Delta\lambda_{var}(t_i) \\ \Delta\lambda_{det}(t_i) = \text{const} \\ \Delta\lambda_{var}(t_i) \neq \text{const} \end{cases}. \quad (5)$$

Вектор ограничений R определяется совокупностью ограничений на исходные данные и переменные. К таким ограничениям относятся как условие постоянства общей пропускной способности КМД, так и условия соответствия тактико-технических характеристик рассматриваемых СВРС и АСУ параметрам модели ($P_{н.н.з}$, λ , M , $D_{мес}$, d_{max} , K). В состав ограничений R включены ограничения на существующие и используемые в данном исследовании модели (R_{model}):

$$R = \begin{cases} \sum_{(M)} C_m = \text{const} \\ P_{н.н}(C_M) \in \{P_{н.н \min}\}_{доп} \\ \lambda \in \{\lambda\}_{доп} \\ M \in \{M\}_{доп} \\ D_{мес} \in \{D_{мес}\}_{доп} \\ d_{max} \in \{d_{max}\}_{доп} \\ K \in \{K\}_{доп} \\ R_{model} \end{cases}. \quad (6)$$

Вектор E включает в себя всю совокупность случайных возмущений на модель КМД, которые не могут быть формализованы в явном виде, но оказывают воздействие на процесс синтеза методики адаптивного управления скоростями ЛС КМД в условиях квазистационарности потоков данных.

Таким образом, проведенный анализ информационного обмена между АКП и ПУ позволяет сделать вывод о том, что входной поток, поступающий на вход КМД, существенно отличается от стационарного. Представление потока информационного обмена в стационарном виде (без введения в модель сети элементов, учитывающих нестационарную составляющую входного потока) ведет к ошибке определения вероятности наведения АКП на цель. В интересах поддержания вероятности наведения АКП на заданном уровне поставлена задача разработки методики адаптивного распределения скоростей ЛС КМД в новых условиях

квазистационарного входного в КМД потока с учетом заданной вероятности наведения АКП.

Методика

Нестационарный поток информационного обмена между пунктом управления и АКП может быть представлен в квазистационарном виде путем разбиения времени информационного обмена на интервалы T_n , равные циклам управления АСУ. Внутри каждого из интервалов поток представляется в стационарном виде, а значения интенсивности при переходе к следующему циклу управления определяются вектором \mathbf{G} (5). Для решения задачи адаптации параметров КМД к квазистационарному потоку информационного обмена $\lambda(t)$ предложена декомпозиция оценки информационного обмена на постоянную $\lambda_{det}(t)$ и переменную $\lambda_{var}(t)$ составляющие. Для получения аналитической функции значений переменной составляющей информационного обмена $\tilde{\lambda}_{var}(t)$ используется аппроксимация $\lambda_{var}(t)$ методом наименьших квадратов, что позволяет получить аппроксимирующие уравнения $\tilde{\lambda}_{var}(t)$ линейного

$$\tilde{\lambda}_{var}(t) = \frac{12 \sum_{i=1}^n \lambda_i t_i}{n^3 - n} t + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (7)$$

и параболического типа

$$\begin{aligned} \tilde{\lambda}_{var}(t) = & \frac{15 \left(12 \sum_{i=1}^n \lambda_i t_i^2 + \sum_{i=1}^n \lambda_i - n^2 \sum_{i=1}^n \lambda_i \right)}{n^5 - 5n^3 + 4n} t^2 + \\ & + \frac{12 \sum_{i=1}^n \lambda_i t_i}{n^3 - n} t + \frac{(9n^2 - 21) \sum_{i=1}^n \lambda_i - 60 \sum_{i=1}^n \lambda_i t_i^2}{4n(n^2 - 1)}, \quad (8) \end{aligned}$$

где n — число значений оценки интенсивности $\lambda_{var}(t)$; λ_i — стационарное значение переменной составляющей информационного потока $\lambda_{var}(t)$ на i -м цикле управления; t_i — дискретные моменты времени, соответствующие началу i -го цикла управления.

Применение интерполяционных многочленов и полиномиальных моделей (полиномов Лагранжа, Чебышева и Ньютона) нецелесообразно из-за необходимости дополнительной проверки на сходимость за пределами статистической выборки. Выбор типа модели определяется выполнением условия стремления к нулю ускоряющейся составляющей параболического аппроксимирующего уравнения (8):

$$\lim_{n \rightarrow n_0} \frac{15 \left(12 \sum_{i=1}^n \lambda_i t_i^2 + \sum_{i=1}^n \lambda_i - n^2 \sum_{i=1}^n \lambda_i \right)}{n^5 - 5n^3 + 4n} = 0, \quad (9)$$

где n_0 — текущее значение циклов управления, на котором возможно использование линейной аппроксимации (7).

Выполнение условия (9) позволяет использовать для аппроксимации нестационарной составляющей $\lambda_{var}(t)$ уравнение линейного типа (7), а уравнение (8) — в противном случае.

Проверка адекватности уравнений (7) и (8), аппроксимирующих нестационарную составляющую квазистационарного потока $\lambda_{var}(t)$, производится:

— по коэффициенту детерминации аппроксимирующего уравнения

$$B = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\tilde{\lambda}_{var}(t_i) - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lambda_{var i} n_i \right)^2}{\sum_{i=1}^n \left(\lambda_{var i} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lambda_{var i} n_i \right)^2}; \quad (10)$$

— коэффициенту корреляции рангов Спирмена

$$\rho = 1 - \frac{6}{n^3 - n} \sum_{i=1}^n \left(\lambda_{var i} - \tilde{\lambda}_{var}(t_i) \right)^2; \quad (11)$$

— оценке средней ошибки аппроксимации

$$\bar{e} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|\lambda_{var i} - \tilde{\lambda}_{var}(t_i)|}{\lambda_{var i}} \quad (12)$$

и определяется выполнением комплексного условия

$$\begin{cases} \lim_{n \rightarrow n_0} B = 1 \\ \lim_{n \rightarrow n_0} \rho = 1 \\ \bar{e} \leq 0,15 \end{cases} \quad (13)$$

Уравнения (7) и (8) позволяют получить максимальную интенсивность информационного потока $\tilde{\lambda}(t_k)$ в следующий цикл управления АСУ t_k для каждого из ЛС КМД в виде функции (14) с учетом ошибок аппроксимации $\Delta \tilde{\lambda}_{var}(t_k)$, определяемых выражением (12):

$$\tilde{\lambda}(t_k) = \lambda_{det}(t_k) + \tilde{\lambda}_{var}(t_k) + \Delta \tilde{\lambda}_{var}(t_k); \quad (14)$$

$$\Delta \tilde{\lambda}_{var}(t_k) = t m_{\tilde{\lambda}}(t_k), \quad (15)$$

где t — величина t -критерия Стьюдента при доверительной вероятности β ; $m_{\tilde{\lambda}}(t_k)$ — средняя ошибка аппроксимации.

Вероятность наземного наведения $P_{н.н}$, определяемая выражением (2), при допущении об отсутствии маневра цели по курсу ($m_Q = 0$) будет иметь вид

$$P_{н.н} = \Phi \left(\frac{T_n \Delta Q_{доп}}{2T_3} \right), \quad (16)$$

где

$$T_3 = \frac{T_n \Delta Q_{доп}}{2 \arg \Phi(P_{н.н})}. \quad (17)$$

Выражение (17) будет определять время минимальной задержки сообщений T_3 при заданной вероятности наведения $P_{н.н} = P_{н.н.3}$. Приравняв выражение (17) к времени задержки сообщений в ЛС КМД (1) и обозначив $A = d_{\max}/(cD_{\text{mes}})$, получим уравнение относительно скорости ЛС КМД C при прочих заданных параметрах ($P_{н.н}, \lambda, M, D_{\text{mes}}, d_{\max}, K, T_{\text{н}}, \Delta Q_{\text{доп}}$):

$$\left(AD_{\text{mes}} - \frac{T_{\text{н}} \Delta Q_{\text{доп}}}{2 \arg \Phi(P_{н.н})} + \frac{4\lambda A^2 D_{\text{mes}}}{e^{-A\lambda}} \right) + \frac{1}{C} \left(D_{\text{mes}} + \frac{2\lambda AD_{\text{mes}}(K+2)}{e^{-A\lambda}} \right) + \frac{1}{C^2} \left(\frac{\lambda D_{\text{mes}}(K+1)}{e^{-A\lambda}} \right) = 0. \quad (18)$$

Исследование корней уравнения (18) показало, что данное уравнение на диапазоне допустимых в реальном КМД варьируемых параметров имеет единственное решение:

$$C_{1,2} = \frac{D_{\text{mes}}(\arg \Phi(P_{н.н})) \left(-4A(\tilde{\lambda}_{\max}(t_k))(K+2) - e^{-A(\tilde{\lambda}_{\max}(t_k))} \right)}{4AD_{\text{mes}}(\arg \Phi(P_{н.н})) \left(e^{-A(\tilde{\lambda}_{\max}(t_k))} + 4(\tilde{\lambda}_{\max}(t_k))A \right) - 2T_{\text{н}} \Delta Q_{\text{доп}} e^{-A(\tilde{\lambda}_{\max}(t_k))}} \pm \sqrt{\frac{D_{\text{mes}}(\arg \Phi(P_{н.н})) e^{-A(\tilde{\lambda}_{\max}(t_k))} \left[4(\tilde{\lambda}_{\max}(t_k))AD_{\text{mes}}(\arg \Phi(P_{н.н})) + 2(\tilde{\lambda}_{\max}(t_k))T_{\text{н}} \Delta Q_{\text{доп}}(K+1) \right]}{4AD_{\text{mes}}(\arg \Phi(P_{н.н})) \left(e^{-A(\tilde{\lambda}_{\max}(t_k))} + 4(\tilde{\lambda}_{\max}(t_k))A \right) - 2T_{\text{н}} \Delta Q_{\text{доп}} e^{-A(\tilde{\lambda}_{\max}(t_k))}}}}, \quad (19)$$

где $\arg \Phi(P_{н.н})$ — такое значение аргумента функции $\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$, при котором функция $\Phi(x)$ принимает значение $P_{н.н}$.

Таким образом, решением задачи (3) является функция необходимой скорости ($C_{\text{необ}}$) m -го ЛС (19) при условиях **V, G, R** (4)–(6). В функции (19) параметр λ является варьируемым и определяется функцией (14), а параметры $D_{\text{mes}}, \lambda, K, d_{\max}, P_{н.н}$ являются ограничениями на решение задачи (3) и определяются тактико-техническими характеристиками СВРС и требованиями по боевой эффективности АКП.

Исследование зависимости функции необходимой пропускной способности ЛС КМД (19) от численных значений объема пакета в КМД D_{mes} , количества повторов сообщения в случае ошибки при отправке K , минимально допустимой вероятности наведения АКП $P_{н.н}$ и максимального радиуса КМД d_{\max} показало, что в интересах снижения требуемой общей пропускной способности СВРС необходимо обеспечить минимизацию параметров D_{mes}, K и $P_{н.н}$ в рамках допустимых тактико-технических характеристик СВРС.

При исследовании влияния вектора **E** на функцию (19) путем воздействия случайной составляющей в показателях: повторных передач сообщений K , реально выделенной скорости ЛС КМД C , ошибочно оцененных интенсивностях на предыдущих этапах управления $\Delta \tilde{\lambda}_{\text{var}}(t_k)$ — выявлено, что увеличение ошибок в определении вышеуказанных показателей существенно снижает коэффициент детерминации (10) и адекватность получаемых аппроксимирующих уравнений (7), (8), определяемых условием (13). Это ведет к росту времени накопления статистических оценок интенсивности на этапах управления АКП для соответствия аппроксимирующих уравнений (7), (8) критерию адекватности (13).

Перспективный АСМСД использует для доступа к КМД метод случайного доступа CSMA/CD, описываемый стандартом IEEE 802.3, на MAC-подуровне (Media access control — управление доступом к устройствам) канального уровня ЭМВОС. Для решения частной задачи реализации методики адаптивного распределения скоростей ЛС в КМД был модифицирован метод доступа CSMA/CD и на его основе синтезирована методика управления доступом ЛС к КМД за счет варьирования длительности паузы захвата КМД.

Зависимость между скоростью передачи по каждому из ЛС ($C_{\text{необ } m}$) и вероятностью доступа m -го ЛС к среде передачи КМД (P_m) определяется следующим равенством:

$$\frac{1}{C_e} \sum_{m=1}^M C_{\text{необ } m} = \sum_{m=1}^M P_m = 1. \quad (20)$$

При этом вероятность доступа каждого из ЛС P_m будет зависеть от общей эффективной пропускной способности КМД C_e , определяемой выражением

$$C_e = \frac{\lambda C e^{-\frac{d_{\max} \lambda}{cD_{\text{mes}}}}}{\left(1 + 2 \frac{d_{\max} C}{cD_{\text{mes}}} \right) \lambda + C e^{-\frac{d_{\max} \lambda}{cD_{\text{mes}}}}}. \quad (21)$$

В методе доступа CSMA/CD требования по скорости передачи данных по ЛС равны для каждого из ЛС ($C_{\text{необ}1} = \dots = C_{\text{необ}m} = \dots = C_{\text{необ}M}$). То есть доступ ЛС к среде передачи КМД равновероятен ($P_1 = \dots = P_m = \dots = P_M$), определяется выражением

$$P_m = \frac{1}{M} \quad (22)$$

и не зависит от интенсивности информационного обмена.

Однако при информационном обмене между АКП и пунктом управления на вход КМД поступает квазистационарный поток, и требования по скорости каждого ЛС ($C_{\text{необ}m}$) неравны ($C_{\text{необ}1} \neq \dots \neq C_{\text{необ}m} \neq \dots \neq C_{\text{необ}M}$) и определяются выражением (19). В этом случае необходимая вероятность доступа к КМД будет зависеть от адаптивных требований каждого из ЛС ($C_{\text{необ}m}$) к прогнозируемым интенсивностям информационного обмена λ и определяться выражением

$$P_m = \frac{C_{\text{необ}m}}{C_e} \quad (23)$$

Таким образом, при практической реализации новой методики адаптивного управления доступом ЛС к КМД потребуются изменение параметров протокола управления доступом и захватом канала. Анализ алгоритма захвата канала, соответствующий методу CSMA/CD, показал, что захват канала осуществляется за счет генерации случайной (равномерно распределенной по одинаковой для всех ЛС длительности паузы захвата КМД $T_{\text{захв}}$) задержки передачи данных. Предлагается осуществить распределение скоростей ЛС с помощью адаптивного управления длительностью паузы захвата КМД в каждом из ЛС.

При этом адаптивная длительность паузы захвата канала в m -м ЛС ($T_{\text{захв}m}$) будет определяться выражением

$$T_{\text{захв}m} = T_{\text{захв}} \frac{C_{\text{необ}m}}{C_e} \quad (24)$$

и зависеть от необходимой скорости ЛС ($C_{\text{необ}m}$), что отличается от метода CSMA/CD, предполагающего равные скорости передачи данных по ЛС:

$$T_{\text{захв}} = \text{const.}$$

Соотношение (24) позволяет применить данный подход ко всему классу протоколов случайного доступа с постоянной длительностью паузы захвата КМД для формирования новых, адаптивных к необходимой скорости, правил захвата КМД.

Заключение

Анализ полученных результатов показывает, что методика адаптивного распределения скоростей ЛС в КМД за счет введения элементов аппроксимации лучше оценивает квазистационар-

ный информационный поток, циркулирующий между абонентами КМД. При этом максимальная оценка значений квазистационарного потока и аналогичная оценка того же потока как стационарного с незначительными отклонениями могут совпадать. Однако за счет введения в указанную методику ограничений по вероятности наведения, даже при совпадающей оценке интенсивностей потоков, требования к скорости ЛС КМД существенно различаются (при реализации предлагаемой методики — выше). Это обусловлено тем, что при наличии критически больших значений интенсивности входного потока адаптивное управление использует все возможности по пропускной способности КМД для поддержания заданной вероятности наведения. Между тем неадаптивное назначение скоростей ЛС производит распределение скорости ЛС не в соответствии с потребностями в объемах передаваемой информации, а в соответствии с количеством абонентов КМД, что представляет собой довольно грубую оценку необходимых ресурсов. Вероятность доступа к КМД существенно меняется в зависимости от оцененной интенсивности информационного обмена на всем протяжении полета АКП и определяется количеством АКП, находящихся на управлении АСУ, и потребностями в передаче информации. Это значительно отличает предлагаемый алгоритм от существующего, в котором вероятность доступа определяется как величина, обратная количеству управляемых АКП без учета потребности абонентов в информационном обмене.

Литература

1. Клейнрок Л. Вычислительные сети с очередями: Пер. с англ. М.: Мир, 1979. 600 с.
2. Макаренко С. И. Методика оценки времени задержки пакета в канале связи в условиях нестабильности входного трафика // Инфокоммуникационные технологии. 2007. Т. 5. № 3. С. 94–96.
3. Макаренко С. И., Сидорчук В. П., Краснокутский А. В. Методика оценки времени задержки пакета в сети воздушной радиосвязи в условиях нестабильности входного трафика // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2007. Т. 10. № 6. С. 70–74.
4. Макаренко С. И., Кихтенко А. В. Методика оценки времени задержки пакета в спутниковой сети связи в условиях нестабильности входного трафика // Системы управления и информационные технологии. 2007. № 1.3 (27). С. 344–348.
5. Авиация ПВО России и научно-технический прогресс: боевые комплексы и системы вчера, сегодня, завтра: Монография / Под ред. Е. А. Федосова. М.: Дрофа, 2005. 815 с.
6. Боевое применение и боевая эффективность авиационных комплексов войск ПВО страны / Под ред. В. Н. Абрамова. М.: Военное издательство МО СССР, 1979. 520 с.

УДК 004.9

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ РАСПОЗНАВАНИЕ ЭЛЕКТРОЭНЦЕФАЛОГРАММ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА АНАЛИЗА ФРАКТАЛЬНОЙ ДИНАМИКИ

Р. И. Полонников,

доктор техн. наук, профессор

Е. Л. Вассерман,

канд. мед. наук, старший научный сотрудник

Н. К. Карташев,

научный сотрудник

Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН

Приводятся результаты применения признаков, рассчитанных методом анализа фрактальной динамики, для обучаемой классификации электроэнцефалограмм. Путем соотнесения с результатами, полученными на случайных выборках, показана значимость положительных результатов распознавания.

Ключевые слова — цифровая электроэнцефалография, метод анализа фрактальной динамики, распознавание функциональных состояний, случайный поиск с адаптацией.

Введение

Электроэнцефалография является одним из основных методов изучения и диагностики функций центральной нервной системы. Электроэнцефалограмма (ЭЭГ) — это запись суммарной электрической активности мозга. Она представляет собой многоканальный шумоподобный нестационарный сигнал. Анализируя ЭЭГ, врач-электроэнцефалографист делает заключение о функциональных и морфологических особенностях головного мозга обследуемого, о характере и выраженности имеющейся у него церебральной патологии. Эта работа плохо поддается автоматизации из-за сложности объекта исследования и порождаемого им сигнала, обилия трудноустраняемых артефактов, большого удельного веса слабоформализуемых эмпирических знаний и использования при принятии решения контекстной информации. Поэтому автоматизация анализа и интерпретации ЭЭГ до сих пор остается не решенной в полном объеме актуальной теоретической и практической задачей. Программные средства, созданные в результате ее решения, могут быть востребованы в телемедицине, медицине катастроф, военной медицине, а также при мониторинге ЭЭГ и скрининговых исследованиях.

Задача распознавания ЭЭГ в этом случае может быть сформулирована следующим образом. Требуется построить автоматизированную систему, спо-

собную на основе анализа ЭЭГ испытуемого высказать предположение о его принадлежности к одному из классов. Ключевым элементом подобной системы может стать метод, позволяющий сопоставить электроэнцефалограмме вектор числовых признаков, используя который можно было бы проводить обучаемую классификацию статистическими и другими методами. Авторами был предложен такой метод, получивший название «метод анализа фрактальной динамики» (АФД) [1, 2]. Он предполагает разбиение многоканальной ЭЭГ на 30 односекундных одноканальных фрагментов с последующим вычислением ряда ее параметров, которые изменяются во времени и пространстве (т. е. по поверхности головы) и доступны для вторичной статистической обработки. В целом с помощью метода можно получить набор информативных параметров ЭЭГ, которые характеризуют ее динамику как мультифрактала [3].

В данной работе обсуждаются результаты эксперимента по обучаемой классификации файлов ЭЭГ. Классификация проводилась с использованием наиболее информативных подсистем признаков из общего набора признаков, найденных методом АФД.

Материал и методы

В нашем распоряжении была база из 109 ЭЭГ, зарегистрированных по 12 каналам с верхним гра-

ничным фильтром 30 Гц, постоянной времени 0,3 с и частотой дискретизации 200 Гц. ЭЭГ были разделены врачом-экспертом на несколько классов. Наиболее представительными оказались классы «все больные» (62 чел.) и «все здоровые» (47 чел.). Далее описываются эксперименты по распознаванию именно этих классов.

Все ЭЭГ были подвергнуты обработке методом АФД с использованием реализации алгоритмов метода, приведенной в работе [1]. В результате каждому файлу оказалась сопоставлен один или несколько векторов из $n = 28$ информативных признаков (действительных чисел); число векторов соответствует количеству полных 30-секундных безартефактных фрагментов фоновой ЭЭГ, которые удалось выделить в файле.

Поскольку прямая физиологическая трактовка большинства АФД-признаков затруднительна, заранее невозможно выбрать те признаки, использование которых дает положительный эффект при распознавании объектов из выбранных классов, и исключить те, которые лишь ухудшают его результаты. Кроме того, число объектов в выборке было небольшим. Возникла необходимость решить хорошо известную задачу выбора наиболее информативной подсистемы (подмножества) из m признаков ($m < n$). Чтобы избежать полного перебора, был использован алгоритм случайного поиска с адаптацией (СПА). Алгоритм СПА реализует направленный случайный поиск наиболее информативной подсистемы признаков. В отличие от метода Монте-Карло, в процессе поиска производится «поощрение» и «наказание» отдельных признаков в зависимости от результатов испытаний групп подсистем. Алгоритм СПА был реализован на языке MATLAB в полном соответствии с работой Г. С. Лбова [4].

Для распознавания использовались методы дискриминантного анализа: линейный классификатор, квадратичный классификатор, классификатор с использованием расстояния Махаланобиса и классический байесовский классификатор. Первые три представлены М-функцией `classify`, взятой из Statistics Toolbox пакета MATLAB (версия 6.5, SP 1). Метод Байеса был реализован в виде отдельной М-функции.

Результаты

Из векторов информативных признаков, полученных при анализе файлов ЭЭГ, было составлено четыре обучающие и четыре контрольные выборки одинаковой величины в соответствии с вариантом разбиения на классы «все больные» (1-й класс) и «все здоровые» (2-й класс). Выборки набирались случайным образом так, чтобы количества объектов в классах совпадали. Попадания векторов признаков одного и того же файла ЭЭГ одновременно на обучение и на контроль не допускалось. Таким образом, количество объектов в каждой выборке равнялось 46 (по 23 объекта 1-го и 2-го класса).

Для каждой из четырех пар «обучающая выборка — контрольная выборка» было проделано следующее. Зафиксированы параметры алгоритма СПА и минимизируемая алгоритмом СПА функция — количество ошибок, допущенных примененным методом распознавания на обучающей выборке. Параметр m (размер подбираемой подсистемы признаков) варьировался от 2 до 9. Также перебирались 4 вышеуказанных метода распознавания. Для каждого сочетания m и метода распознавания производилось 7 запусков алгоритма СПА. Таким образом, всего было выполнено 896 запусков и составлена таблица испытаний, в которую для каждого запуска вносились следующие результаты: найденная подсистема признаков, значение критериальной функции в момент останова алгоритма, проценты правильных распознаваний (полученные применением каждого базового метода распознавания к обучающей и контрольной выборкам при использовании найденной подсистемы признаков), количество произведенных групп испытаний и машинное время, затраченное на вычисления. В таблице приведены некоторые характеристики, полученные путем усреднения результатов всех запусков алгоритма СПА.

Также была подсчитана частота вхождения отдельных информативных признаков в найденные алгоритмом СПА подсистемы как отношение количества подсистем, в которые входит признак, к общему числу проведенных запусков алгоритма.

Заключительный эксперимент проведен для проверки значимости полученных результатов.

Интегральные результаты распознавания

Показатель	Разбиение на классы «все больные» — «все здоровые»	Случайное разбиение на классы
1	2	3
Средний процент правильных распознаваний, сделанных на контрольной выборке	68 %	51 %
Среднеквадратическое отклонение процента правильных распознаваний	6,2 %	6,3 %
Среднее количество испытаний за один запуск алгоритма СПА	3356	3570
Среднее машинное время, затрачиваемое на один запуск алгоритма СПА (характеристики ЭВМ: P3 667 МГц, ОЗУ 256 Мб)	32,7 с	34,4 с
Процент запусков алгоритма СПА, на которых не происходило останова до выполнения максимального числа испытаний (15 тыс.)	4 %	5 %

Было построено четыре пары обучающих и контрольных выборок из тех же объектов, которые входили в выборки, обсуждавшиеся выше. Объекты в них также были разделены поровну на два класса, но номер класса для каждого объекта определялся не экспертом, а генератором случайных чисел. Для этих «бессмысленных» выборок проделано то же количество запусков алгоритма СПА в тех же условиях, что и для основных выборок. Интегральные показатели для соответствующей таблицы испытаний приведены в столбце 3.

Если на контрольной выборке распознавалось в среднем 68% объектов для варианта разбиения на классы «все больные» — «все здоровые», то аналогичная процедура распознавания, примененная к случайной выборке из тех же объектов, привела лишь к 51% правильных распознаваний на контроле при среднеквадратических отклонениях в обоих случаях в 6%. Поэтому можно утверждать, что полученный для неслучайного разбиения на классы результат представляет собой не вычислительный артефакт, а отражение закономерности, присутствующей в исходных данных и выявленной использованными методами.

Заключение

Таким образом, применение метода анализа фрактальной динамики для обработки ЭЭГ в сочетании с методом случайного поиска с адаптацией

для сокращения числа информативных признаков дает положительные результаты при распознавании указанных экспертом классов испытуемых. Значимость полученных результатов подтверждается путем соотнесения их с результатами распознавания случайных выборок. Мы также полагаем, что анализ частот встречаемости отдельных информативных признаков в «успешных» подсистемах позволит наметить направление поиска новых признаков и лучше понять физиологический смысл уже имеющихся.

Литература

1. Вассерман Е. Л., Карташев Н. К., Полонников Р. И. Фрактальная динамика электрической активности мозга. СПб.: Наука, 2004. 208 с.
2. Polonnikov R. I., Wasserman E. L., Kartashev N. K. Regular developmental changes in EEG multifractal characteristics // International journal of neuroscience. 2003. Vol. 113. N 11. P. 1615–1639.
3. Шрёдер М. Фракталы, хаос, степенные законы. Миниатюры из бесконечного рая: Пер. с англ. / НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика». Ижевск, 2001. 528 с.
4. Лбов Г. С. Методы обработки разнотипных экспериментальных данных. Новосибирск: Наука, 1981. 160 с.

УДК 533.9

МЕТОД АКТИВНОЙ МНОГОМОДОВОЙ ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЫ

Л. Кордеро,
аспирант

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Ставится задача определения пространственного распределения концентрации электронов бортовой плазмы. Предлагается использовать решение обратной задачи Штурма—Лиувилля. Исходными данными являются измеренные на нескольких модах значения комплексных коэффициентов отражения в плоскости апертуры бортовой антенны. Рассматривается алгоритм восстановления распределения концентрации электронов.

Ключевые слова — бортовая плазма, концентрация электронов, диагностика плазмы.

Знание электрофизических параметров плазменной оболочки, окружающей гиперзвуковой летательный аппарат (ГЛА) на траектории спуска, совершенно необходимо для расчета прохождения электромагнитной волны через плазму. Оценка этих параметров возможна методом активной многомодовой диагностики.

Предполагается, что свойства плазмы непрерывно изменяются в направлении одной из осей прямоугольной системы координат (оси z , перпендикулярной к поверхности борта ГЛА) и остаются неизменными в плоскостях, перпендикулярных этой оси. Такое предположение вполне правомерно, поскольку газодинамические расчеты показывают, что за исключением мест, где наблюдаются скачки уплотнения набегающего потока, и появляется градиент параметров плазмы вдоль осей x и y . Плазма представляет собой плосконеоднородную среду. При этом рассматривается слой плазмы с малыми потерями: $\frac{\nu(z)}{\omega} \ll 1$, где $\nu(z)$ — частота соударений электронов; ω — циклическая частота зондирующей электромагнитной волны.

Ставится задача определения распределения концентрации электронов плазмы $N_e(z)$ по комплексным коэффициентам отражения мод зондирующей по направлению z электромагнитной волны, т. е. решения обратной задачи радиофизики восстановления профиля плазмы.

Запишем уравнение Гельмгольца для плосконеоднородной среды в виде

$$\nabla^2 E(\vec{r}) + k^2 \varepsilon(z) E(\vec{r}) = 0, \quad (1)$$

где $E(\vec{r})$ — напряженность электрического поля в точке, определяемой радиус-вектором \vec{r} ; k — вол-

новое число; $\varepsilon(z)$ — относительная диэлектрическая проницаемость среды. Перейдем к спектральной плотности функции $\tilde{E}(r)$ через преобразование Фурье по x и y :

$$E(\vec{r}) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \tilde{E}(h, \chi, z) \exp(-i(hx + \chi y)) dh d\chi;$$

$$\tilde{E}(h, \chi, z) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} E(\vec{r}) \exp(i(hx + \chi y)) dx dy,$$

где h и χ — проекции волнового вектора на оси x и y соответственно, а символ “~” означает спектральную плотность. Перепишем уравнение (1), опуская аргументы \vec{r} и z , в следующем виде:

$$\frac{\partial^2 E}{\partial \chi^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial z^2} + k^2 \varepsilon E = 0.$$

Теперь сведем уравнение Гельмгольца к уравнению Штурма—Лиувилля на отрезке, взяв соответствующие производные от (1):

$$-h^2 \tilde{E} - \chi^2 \tilde{E} + \tilde{E}'' + k^2 \varepsilon \tilde{E} = 0.$$

Сгруппировав, получим

$$\tilde{E}'' + \tilde{E}(k^2 - h^2 - \chi^2 - q(z)) = 0$$

или

$$\tilde{E}'' + (\Gamma^2 - q(z)) \tilde{E} = 0, \quad z \in [0, d],$$

где $q(z) = k^2 - k^2 \varepsilon(z) = k^2(1 - \varepsilon(z))$.

Для напряженности электрического поля

$$E''(\Gamma, z) + (\Gamma^2 - q(z)) E(\Gamma, z) = 0. \quad (2)$$

Здесь Γ — продольное волновое число или проекция волнового вектора на ось z ; $k = \sqrt{h^2 + \chi^2 + \Gamma^2}$.

Выражение (2) представляет собой краевую задачу Штурма—Лиувилля на отрезке с параметром Γ — собственным значением данной краевой задачи. Фактически $\Gamma \equiv \Gamma_n = \sqrt{k^2 - \chi^2 - h^2}$, где $n = 1 \dots N$ — число мод зондирующей волны.

Обозначим решение задачи (2) через $E_{\pm}(\Gamma, z)$. Они описывают волны, расходящиеся в направлениях $\pm z$, переходящие соответственно в волны $E_{\pm}(\Gamma, z) \sim \exp(-i\Gamma z)$ при $d \leq z$ и $E_{\pm}(\Gamma, z) \sim \exp(+i\Gamma z)$ при $z \leq 0$ и удовлетворяющие граничным условиям.

Для решения обратной задачи введем в рассмотрение так называемую функцию рассеяния $S(\Gamma)$. При решении задачи Штурма—Лиувилля функция $S(\Gamma)$ представляется следующим образом:

$$S(\Gamma) = \frac{A(\Gamma)}{B(\Gamma)}, \quad (3)$$

где $A(\Gamma)$ и $B(\Gamma)$ — целые функции, определяемые следующими вронскианами:

$$\begin{aligned} & E_+(\Gamma, z), \quad E_-(\Gamma, z); \\ & E'_+(\Gamma, z), \quad E'_-(\Gamma, z); \\ A(\Gamma) &= \begin{vmatrix} E_+(\Gamma, z) & E_-(\Gamma, z) \\ E'_+(\Gamma, z) & E'_-(\Gamma, z) \end{vmatrix}; \\ B(\Gamma) &= \begin{vmatrix} E_-(\Gamma, z) & E_+(\Gamma, z) \\ E'_-(\Gamma, z) & E'_+(\Gamma, z) \end{vmatrix}. \end{aligned} \quad (4)$$

Подставляя (4) в (3) и учитывая, что $E_+(\Gamma, z) \sim \exp(-i\Gamma z)$, а $E_-(\Gamma, z) \sim \exp(+i\Gamma z)$, получим

$$S(\Gamma) = \frac{i\Gamma E_+(\Gamma, z) + i\Gamma E'_+(\Gamma, z)}{i\Gamma E_+(\Gamma, z) - i\Gamma E'_+(\Gamma, z)}.$$

При $z = 0$

$$S(\Gamma) = \frac{i\Gamma E_+(\Gamma, 0) + i\Gamma E'_+(\Gamma, 0)}{i\Gamma E_+(\Gamma, 0) - i\Gamma E'_+(\Gamma, 0)}.$$

Для того чтобы использовать функцию рассеяния для решения поставленной обратной задачи активной многомодовой диагностики плазмы, необходимо определить область изменения, область возможных значений и свойства функции $S(\Gamma)$. Можно показать, что для $\Gamma \in [0, k]$ значения $S(\Gamma)$ являются коэффициентами отражения зондирующих мод от слоя на апертуре излучателя ($z = 0$) в функции продольных волновых чисел.

Для функции рассеяния могут быть доказаны следующие свойства [1], используемые для восстановления ее значений на бесконечном интервале $-\infty \leq \Gamma \leq \infty$.

1. $S(\Gamma) = -1$. Свойство используется при восстановлении значений $S(\Gamma)$ в нуле.

2. В случае среды с малыми потерями $\left(\frac{\nu(z)}{\omega} < 1\right)$

функция $S(\Gamma)$ аналитически продолжается с положительной полуоси на отрицательную, причем

$|S(-\Gamma) - S^*(\Gamma)| < \frac{\max \nu(z)}{\omega}$, т.е. $|S(-\Gamma)| \approx |S^*(\Gamma)|$. Свойство используется при восстановлении значений $S(\Gamma)$ на отрицательной оси.

3. На вещественной оси $S(\Gamma)$ полиномиально убывает по модулю при $|\Gamma| \rightarrow \infty$: $|S(\Gamma)| < \frac{\text{const}}{|\Gamma|}$, т.е. $S(\Gamma) \rightarrow 0$ при $|\Gamma| \rightarrow \infty$. Свойство используется при восстановлении значений $S(\Gamma)$ на бесконечности.

4. В верхней полуплоскости вблизи вещественной оси $S(\Gamma)$ ограничена: $|S(\Gamma)| < M$.

Восстановление концентрации электронов плазмы $Ne(z)$ возможно провести в два этапа:

1) восстановление функции рассеяния по входным данным — комплексным коэффициентам отражения;

2) восстановление распределения концентрации электронов $Ne(z)$ по функции рассеяния: $S(\Gamma) \rightarrow Ne(z)$.

Восстановление функции рассеяния проведем по следующему алгоритму.

1. Восстановление $S(\Gamma)$ в узлах $\Gamma = 0: \pm \Gamma_n \in [-k, k]$.

1.1. Для достаточно большого электрического размера апертуры волновода $\left(\frac{\text{const}}{ka} \rightarrow 0\right)$ принимаем, что на положительной полуоси $\Gamma \in]0, k[$ комплексные коэффициенты отражения n -х мод будут равны соответствующим значениям искомой функции $S(\Gamma_n)$.

1.2. Используя свойство 2 функции $S(\Gamma)$, аналитически продолжаем функцию $S(\Gamma)$ на отрицательную полуось, для чего откладываем в левой полуплоскости еще N дискретных сопряженных значений функции $S(\Gamma)$. Физически $\Gamma \in [0, k]$, но для аналитической процедуры восстановления $Ne(z)$ необходимо продолжить функцию рассеяния на всю ось $-\infty < \Gamma < \infty$, используя свойство аналитического продолжения, и иметь $2N$ значений.

1.3. Используя свойство 1 функции $S(\Gamma)$, восстанавливаем ее значение в нуле: $S(0) = -1$. Получаем $(2N + 1)$ значений.

2. Восстановление функции $S(\Gamma)$ на всем интервале $-\infty < \Gamma < \infty$.

2.1. По $(2N + 1)$ дискретным значениям функции $S(\Gamma_n)$ в узлах известным аналитическим методом (например, кусочно-ломаной аппроксимацией) формируем непрерывную функцию $S(\Gamma_n)$ на промежутке $]-k, k[$.

2.2. Используя свойство 3, функцию $S(\Gamma)$ вне интервала $]-k, k[$ интерполируем нулем. Таким образом, из N значений измеренных комплексных коэффициентов отражения, зондирующих плазму

мод, восстановлена функция рассеяния $S(\Gamma)$ на бесконечном интервале $-\infty < \Gamma < \infty$.

Восстановление распределения концентрации электронов плазмы проведем по восстановленной функции рассеяния. Определим параметр $q(z)$ в краевой задаче Штурма—Лиувилля. В теории обратных задач функция $q(z)$ называется потенциалом рассеяния и для плазменной среды имеет вид

$$q(z) = k^2(1 - \varepsilon(z)). \quad (5)$$

Потенциал рассеяния характеризует рассеивающие свойства зондируемой среды. Диэлектрическая проницаемость плазмы описывается выражением

$$\varepsilon(z) = 1 - \frac{(\omega_0(z)/\omega)^2}{1 - iv(z)/\omega}, \quad (6)$$

где плазменная частота

$$\omega_0(z) = 2\pi 8978 \sqrt{Ne(z)}. \quad (7)$$

Подставляя (6) в (5) и учитывая, что $k^2 = \left(\frac{\omega}{c}\right)^2$,

где c — скорость света, получим связь потенциала рассеяния с плазменной частотой:

$$-q(z) = 1 - \frac{(\omega_0(z)/\omega)^2}{1 - iv(z)/\omega}.$$

Для плазмы с малыми потерями

$$q(z) \approx \left(\frac{\omega_0(z)}{\omega}\right)^2.$$

Учитывая выражение (7), получим связь потенциала рассеяния с искомым распределением концентрации электронов плазмы:

$$Ne(z) = \text{const} q(z), \quad (8)$$

где $\text{const} = \frac{c^2}{4\pi^2(8978)^2}$.

Таким образом, из найденного уравнения (8) видно, что в конечном счете для решения обратной задачи необходимо определить потенциал рассеяния, связанный с искомым распределением простым соотношением (8).

Решение $E_-(\Gamma, z)$ краевой задачи Штурма—Лиувилля представляется следующим оператором преобразования через решение этой же задачи при $q(z) = 0$:

$$E_-(\Gamma, z) = \begin{cases} \exp(i\Gamma z + \int_{-\infty}^{+\infty} K_-(z, t) \exp(i\Gamma t) dt), & z \geq 0 \\ \exp(i\Gamma z), & z < 0 \end{cases}.$$

Подынтегральная функция $K_-(z, t)$ определяется решением уравнения Марченко — основного уравнения теории рассеяния:

$$K(z, t) + f(z+t) + \int_{-\infty}^z K(z, u) f(u+t) dt = 0. \quad (9)$$

Функция $K(z, t)$ является суммируемой на полуоси $-\infty < t \leq z$, причем

$$K(z, z) = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^z q(z) dz. \quad (10)$$

Функция $f(z)$, входящая в (9), представляет собой преобразование Фурье найденной ранее функции рассеяния $S(\Gamma)$ [1, 2]:

$$f(z) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(\Gamma) \exp(i\Gamma z) dz.$$

Связь функции $K(z, t)$ и искомого потенциала рассеяния просто находится, если для решения краевой задачи (2) подставить представление последнего в виде оператора (9) или прямо из выражения (10):

$$q(z) = \begin{cases} 2 \frac{d}{dz} K(z, z), & z \geq 0 \\ 0, & z < 0 \end{cases}.$$

Откуда с учетом выражения для $q(z)$ получаем

$$\omega_0^2(z) = \begin{cases} 2c^2 \frac{d}{dz} K(z, z), & z \geq 0 \\ 0, & z < 0 \end{cases}.$$

Искомое распределение концентрации электронов с учетом (7) определится следующим образом:

$$Ne = \begin{cases} \frac{2c^2 \frac{d}{dz} K(z, z)}{4\pi^2(8978)^2}, & z \geq 0 \\ 0, & z < 0 \end{cases}.$$

Таким образом, полученные соотношения и описанный порядок их применения определяют алгоритм восстановления концентрации электронов бортовой плазмы. Разработанный алгоритм является приближенным. В связи с этим встает вопрос корректности решения обратной задачи многомерной диагностики. Корректность использования математического аппарата решения обратных задач рассеяния (существование, единственность и устойчивость решения) в общем случае полностью доказана в специальных математических работах [1–3].

Литература

1. Марченко В. А. Спектральная теория операторов Штурма—Лиувилля. Киев: Наук. думка, 1972. 200 с.
2. Марченко В. А. Устойчивость обратной задачи теории рассеяния // Матем. сб. 1968. Т. 77(119). № 2. С. 139–162, 300.
3. Лундина Д. Ш., Марченко В. А. Уточнение неравенств, характеризующих устойчивость обратной задачи рассеяния // Матем. сб. 1969. Т. 78(120). № 4. С. 475–484, 500.

АЛЬ-АММОРИ
Али



Гражданин Сирии. Докторант Киевского национального транспортного университета. Почетный вице-президент Киевского научно-методологического центра процессного анализа. В 1992 году окончил Киевский институт инженеров гражданской авиации по специальности «Техническая эксплуатация авиационного оборудования». В 1997 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 80 научных публикаций. Область научных интересов — анализ информационно-управляющих систем и процессов воздушных судов, процессный подход.

АНДРЕЕВ
Сергей
Дмитриевич



Аспирант кафедры безопасности информационных систем Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. В 2006 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения по специальности «Комплексная защита объектов информатизации». Является автором 20 научных публикаций. Область научных интересов — телекоммуникационные системы, множественный доступ, системы массового обслуживания.

ВАССЕРМАН
Евгений
Людвигович



Доцент кафедры психиатрии и наркологии медицинского факультета Санкт-Петербургского государственного университета и кафедры основ коррекционной педагогики Российского государственного педагогического университета им. А. И. Герцена, старший научный сотрудник лаборатории биомедицинской информатики СПИИРАН. В 1992 году окончил Санкт-Петербургский медицинский институт им. акад. И. П. Павлова, 1998 году — Санкт-Петербургский государственный технический университет. В 1999 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата медицинских наук. Является автором более 70 научных публикаций. Область научных интересов — детская невропатология, электроэнцефалография, цифровая обработка сигналов, информационные технологии в медицине.

ГОРОДЕЦКИЙ
Андрей
Емельянович



Доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией методов и средств автоматизации Института проблем машиноведения РАН, заслуженный деятель науки и техники. В 1965 году окончил Ленинградский политехнический институт им. М. И. Калинина. В 1993 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором более 150 научных публикаций и 70 изобретений. Область научных интересов — математическое моделирование, оптимальное управление, идентификация и диагностика.

КАРТАШЕВ
Николай
Константинович



Научный сотрудник лаборатории биомедицинской информатики СПИИРАН. В 1999 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Является автором более 30 научных публикаций. Область научных интересов — изучение электрической активности мозга человека, изучение проблем построения безопасной вычислительной среды, телемедицина.

КОНОВАЛОВ
Александр
Сергеевич



Профессор, заведующий кафедрой управления и информатики в технических системах Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, заведующий лабораторией аэрокосмических технологий Института проблем машиноведения РАН. В 1968 году окончил Ленинградский институт авиационного приборостроения по специальности «Электрооборудование ракет и других летательных аппаратов». В 1997 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором более 150 научных публикаций. Область научных интересов — синтез нелинейных систем автоматического управления сложными объектами, системы искусственного интеллекта.

КОРДЕРО
Либорио



Гражданин Италии. Магистр технических наук, аспирант кафедры радиоэлектронных комплексов Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. В течение 10 лет работал в телекоммуникационных компаниях в Нью-Йорке и Нью-Джерси (США). Обладатель сертификатов CCNP, CCDP, MCSE и CCIE. В 1987 году окончил Рижский государственный институт гражданской авиации. Является автором одной научной публикации. Область научных интересов — радиосвязь с космическими аппаратами на траектории спуска.

МОЛОДЯКОВ
Сергей
Александрович



Доцент кафедры информационных и управляющих систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. В 1981 году окончил Ленинградский политехнический институт им. М. И. Калинина по специальности «Автоматизированные системы обработки информации и управления». В 1989 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором около 100 научных публикаций и 4 изобретений. Область научных интересов — вычислительная оптоэлектроника, методы проектирования систем обработки сигналов и изображений.

НИЛОВА
Алла
Владимировна



Младший инженер отдела тестирования ООО «Scartel Star Lab». В 2008 году окончила Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича по специальности «Системы связи, системы коммутации и вычислительные системы». Область научных интересов — мобильные сети, беспроводные технологии и их анализ.

МАКАРЕНКО
Сергей
Иванович



Преподаватель кафедры эксплуатации и ремонта бортового авиационного радиоэлектронного оборудования (радионавигации и радиосвязи) Ставропольского высшего военного авиационного инженерного училища (военного института) им. маршала авиации В. А. Судца. В 2002 году окончил Ставропольский филиал военного авиационного технического университета им. Н. Е. Жуковского по специальности «Автоматизированные системы управления и обработки информации». В 2007 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 30 научных публикаций. Область научных интересов — исследование нестационарных процессов в сетях связи.

МОСКОВСКИЙ
Александр
Александрович



Старший научный сотрудник Института программных систем РАН. В 1997 году окончил химический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова. В 2001 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата химических наук. Является автором 25 научных публикаций. Область научных интересов — высокопроизводительные вычислительные системы, молекулярное моделирование.

НОВИКОВ
Федор
Александрович



Заведующий лабораторией астрономического программирования Института прикладной астрономии РАН. В 1974 году окончил математико-механический факультет Ленинградского государственного университета. В 1983 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Является автором 40 научных публикаций. Область научных интересов — прикладная математика, технологии программирования.

ОБУХОВА
Наталия
Александровна



Доцент кафедры электронных и телевизионных систем Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. В 1991 году окончила Ленинградский электротехнический институт им. В. И. Ульянова (Ленина). В 1996 году защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 30 научных публикаций. Область научных интересов — системы и методы видеонаблюдения, обработка изображений в целях сегментации, сопровождения и классификации подвижных объектов.

ПОЛОННИКОВ
Револьд
Иванович



Профессор, главный научный сотрудник лаборатории биомедицинской информатики СПИИРАН, заслуженный деятель науки и техники РФ, лауреат Государственной премии РФ. 26 марта 2008 года ушел из жизни. В 1957 году окончил Ленинградский электротехнический институт связи им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. В 1983 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором более 200 научных публикаций, 50 запатентованных изобретений. Область научных интересов — связь и навигация, бионика, информатика и теория информации, телемедицина, изучение электрической активности мозга человека, философия.

ПЕРВИН
Артем
Юрьевич



Инженер-программист Института программных систем РАН. В 2006 году окончил Университет г. Переславля по специальности «Прикладная информатика и математика». Является автором 14 научных публикаций. Область научных интересов — параллельные вычисления, распределенные и грид-системы, технологии виртуализации.

СТЕПАНЯН
Карлен
Багратович



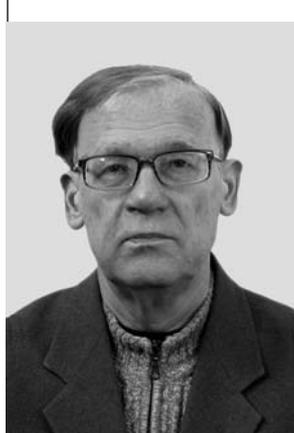
Начальник отдела управления операционного обслуживания УК «Арсаргера», аспирант кафедры прикладной математики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. В 2003 году окончил Санкт-Петербургский государственный политехнический университет. Является автором трех научных публикаций. Область научных интересов — спецификация и построение диаграмм.

ТАРАСОВА
Ирина
Леонидовна



Доцент, старший научный сотрудник Института проблем машиноведения РАН. В 1978 году окончила Ленинградский политехнический институт им. М. И. Калинина. В 1998 году защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 50 научных публикаций. Область научных интересов — математическое моделирование, оптимальное управление, идентификация и диагностика.

ТИМОФЕЕВ
Борис
Семенович



Профессор кафедры электронных и телевизионных систем Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. В 1959 году окончил Ленинградский институт авиационного приборостроения. В 1987 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором более 150 научных публикаций. Область научных интересов — разработка и исследование автоматизированных телевизионных комплексов различного назначения на базе микроЭВМ и персональных компьютеров.

**ТЮРЛИКОВ
Андрей
Михайлович**



Доцент кафедры безопасности 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 более 80 научных публикаций.

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

**ЯКИМОВСКИЙ
Дмитрий
Олегович**



Начальник лаборатории ФГУП «НИИ командных приборов».

В 1987 году окончил Ленинградский институт авиационного приборостроения по специальности «Электрические машины».

Является автором 9 научных публикаций.

Область научных интересов — системы управления космическими аппаратами, мехатроника.

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.

UDK 004.386, 004.272

Оптоэлектронные процессоры с ПЗС-фотоприемниками. Конвейерная обработка сигналов

Молодяков С. А. Информационно-управляющие системы, 2008. № 6. С. 2–8.

Обсуждаются алгоритмы потоковой обработки информации в оптоэлектронных процессорах. Конвейерная обработка сигналов с применением ПЗС-фотоприемника в специальном режиме накопления позволяет существенно сжать поток данных на входе цифрового узла. Приводится одна из возможных реализаций оптоэлектронного процессора непрерывной обработки сигналов применительно к задаче радиоастрономии.

Ключевые слова — оптоэлектронный процессор, конвейер, фотоприемник на приборе с зарядовой связью, акустооптический анализатор спектра, аппаратная функция, пульсар.

Список лит.: 19 назв.

UDK 621.397.13:656.021

Сегментация и сопровождение объектов в сложных условиях видеонаблюдения

Обухова Н. А., Тимофеев Б. С. Информационно-управляющие системы, 2008. № 6. С. 9–15.

Рассмотрен метод сегментации и сопровождения объектов на основе их слоевого представления. Метод реализует автоматический захват нескольких объектов на неоднородном фоне и их устойчивое сопровождение в сложных динамических сценах. Описаны априорная и апостериорная оценки достоверности векторов движения, а также анализ траекторий объектов интереса на этапе сопровождения, обеспечивающие применение метода слоевого представления при низких соотношениях сигнал/шум в исходных видеоданных.

Ключевые слова — сегментация, сопровождение, слоевое представление, векторы движения, апостериорная достоверность, субпиксельная оценка векторов движения.

Список лит.: 7 назв.

UDK 629.735.083.06

Оценка эффективности способов повышения достоверности данных в информационно-управляющих системах при информационном резервировании

Аль-Аммори А. Информационно-управляющие системы, 2008. № 6. С. 16–21.

Проводится исследование способов информационного резервирования как основного условия обеспечения достоверности данных, получаемых от разных источников информации, к которым относятся контролируемые датчики сигналов и измерители всевозможных физических величин. Рассматриваются основные виды информационного резервирования (параллельное, последовательное и комбинированное) для выбора более эффективных, отказоустойчивых и отказобезопасных структур информационно-управляющих систем самолетов нового поколения.

Ключевые слова — источник информации, достоверность информации, информационное резервирование, вероятность ложной тревоги, вероятность необнаружения.

Список лит.: 6 назв.

UDK 004.386, 004.272

Optoelectronic processors with CCD photo detectors. Pipeline signal processing

Molodyakov S. A. IUS, 2008. N 6. P. 2–8.

Algorithms of stream data processing in optoelectronic processors are discussed. The pipeline signal processing employing CCD photo detectors in a special accumulation mode allows to compress the input data flow of the digital unit. The optoelectronic processor was successfully used in a radio telescope.

Keywords — optoelectronic processor, pipeline, CCD photo detector, acousto-optic spectrum analyzer, instrument function, pulsar.

Refs: 19 titles.

UDK 621.397.13:656.021

Objects segmentation and tracking in difficult conditions of video observation

Obukhova N. A., Timofeev B. S. IUS, 2008. N 6. P. 9–15.

A method of objects segmentation and tracking based on their layer representation is reviewed. The method provides automatic capture of several objects in an inhomogeneous background and steady objects tracking in the complete dynamic scenes. The a priori and a posteriori estimations of motion vectors reliability and principles of objects tracks analysis at the tracking stage are given in detail. The suggested solution provides a layer representation method application for video data with low signal to noise ratio.

Keywords — segmentation, tracking, layer representation, motion vector, a posteriori reliability, sub pixel estimation of motion vectors.

Refs: 7 titles.

UDK 629.735.083.06

Estimation of efficiency of ways to increase reliability of data in information-control systems at information reservation

Al-Ammouri A. IUS, 2008. N 6. P. 16–21.

We provide the results of the research of ways of information reservation as a basic condition of providing reliability of data received from different information sources which the supervisory sensors of signals and measuring devices of various physical sizes belong to. The basic types of information reservation (parallel, consecutive and combined) are examined to choose more effective, trouble stable and trouble shooting structures of information-control systems of airplanes of new generation.

Keywords — information source, information reliability, information reservation, false alarm probability, undetection probability.

Refs: 6 titles.

УДК 519.2:519.7

Алгебраические методы получения и преобразования изображений при технической диагностике сложных систем в условиях неполной определенности (Часть 2)

Городецкий А. Е., Тарасова И. Л. Информационно-управляющие системы, 2008. № 5. С. 22–25.

Предлагается использовать логико-вероятностные модели для диагностики структурно-сложных систем. Показано, что тогда оптимизация стратегий и тактик поиска неисправностей может быть сведена к вычислению матриц систем алгебраических уравнений по модулю два с минимальным количеством единиц и упорядочиванию строк таких матриц по убыванию вероятностей решений. Рассматриваются проблемы аппроксимации логико-вероятностных изображений сложных систем, построения, верификации, классификации и редуцирования адекватных логико-вероятностных моделей, а также проблемы распознавания изображений неисправных систем с указанием причин неисправностей.

Ключевые слова — техническая диагностика, неполная определенность, логико-вероятностные модели, сложные системы, нечеткая задача принятия решения, обработка изображений, алгебраические методы.

Список лит.: 8 назв.

УДК 629.76.051

Управление электроприводами космических аппаратов в особых режимах

Коновалов А. С., Якимовский Д. О. Информационно-управляющие системы, 2008. № 6. С. 26–31.

Рассмотрены вопросы программного разгона ротора гироскопа с газодинамическими опорами и бесконтактным двигателем постоянного тока с постоянными магнитами. Исследовано влияние параметров программы на динамику движения ротора в условиях неустойчивости момента сопротивления в опорах.

Ключевые слова — управление, ротор гироскопа, бесконтактный двигатель, газодинамическая опора.

Список лит.: 6 назв.

УДК 004.434

Использование порождающего программирования при реализации языка описания диаграмм

Новиков Ф. А., Степанян К. Б. Информационно-управляющие системы, 2008. № 6. С. 32–35.

Язык описания диаграмм DiaDeL позволяет формально определить графический синтаксис (нотацию) диаграмм заданного типа и связать нотацию с семантикой, заданной в форме набора классов. В статье обсуждается применение порождающего программирования при реализации этого языка.

Ключевые слова — порождающее программирование, метамоделирование, графический язык, абстрактный синтаксис.

Список лит.: 13 назв.

УДК 519.2:519.7

The algebraic methods of image creation and processing during engineering diagnostics of the complex systems under incomplete conditions (Part 2)

Gorodetskyi A. E., Tarasova I. L. IUS, 2008. N 5. P. 22–25.

The tapping of the logic-probabilistic models for diagnostic of the structured-and-complex systems are recommended. It is shown that Pareto optimal strategy and tactics of the break-downs may be used in finding matrix of the system of the algebraic equation by module two with as few as possible of one, and to order rows of this matrix in the descending order of the decision probability. The problems of the approximation of the logic-probabilistic images of the complex systems, of the creation, verification, classification and reduction of the adequate logic-probabilistic models, as well as problems of the image identification of the down systems with indicating of the defects, are considered.

Keywords — technical diagnostics, ambiguousness, logical-probability models, complex systems, unclear decision-making task, image processing, algebraic methods.

Refs: 8 titles.

УДК 629.76.051

Spacecraft electric drives control under special conditions
Konovalev A. S., Yakimovskiy D. O. IUS, 2008. N 6. P. 26–31.

The issue of program start-up of a gyro with a gas lubricating bearing and a brushless motor are examined. The program parameters influencing the dynamics of the rotors motion, when a slip torque of the bearing is unstable, are studied.

Keywords — control, rotor, gyro, brushless motor, gas-dynamic bearing.

Refs: 6 titles.

УДК 004.434

Diagram Definition Language Implementation with Generative Programming

Novikov F. A., Stepanyan K. B. IUS, 2008. N 6. P. 32–35.

The diagram definition language *DiaDeL* allows users to formally define graphical notation for the diagram of the certain type and to bind the notation to the semantics, which is given as a set of classes. The paper discusses usage of the generative programming for the implementation of the language.

Keywords — generative programming, meta-modeling, graphics language, abstract syntax.

Refs: 13 titles.

УДК 519.687.1

Виртуальные приложения для грид-вычислений

Первин А. Ю., Московский А. А. Информационно-управляющие системы, 2008. № 6. С. 36–43.

Разработано программное обеспечение для развертывания и управления приложениями, работающими внутри виртуальных машин. Созданы и протестированы следующие приложения: вычислительный сервис и веб-сервис. Составлены профили этих приложений и изучены зависимости между производительностью приложений и ресурсами. Представлены промежуточные результаты активного исследования, направленного на изучение вопросов управления аппаратными ресурсами с использованием математической теории.

Ключевые слова — виртуальные машины, виртуальные сервисы, соглашения об уровне сервиса, оптимальное управление.

Список лит.: 22 назв.

УДК 004.728.3.057.4

Использование конкурентного опроса в широкополосных беспроводных сетях

Андреев С. Д., Нилова А. В., Тюрликов А. М. Информационно-управляющие системы, 2008. № 6. С. 44–53.

Исследуется эффективность механизмов конкурентного опроса абонентов на этапе запроса ресурсов канала в стандарте IEEE 802.16. Доказывается общее утверждение относительно «симметричной» группировки абонентов в системе случайного множественного доступа. Анализируются режимы общего и группового конкурентного опроса, для которых оптимизируется работа усеченного алгоритма двоичной экспоненциальной «отсрочки» при различных настройках системы связи.

Ключевые слова — широкополосные сети, IEEE 802.16, методы резервирования, множественный доступ, алгоритм двоичной экспоненциальной «отсрочки».

Список лит.: 22 назв.

УДК 519.872

Адаптивное управление скоростями логических соединений в канале радиосвязи множественного доступа

Макаренко С. И. Информационно-управляющие системы, 2008. № 6. С. 54–58.

Приведена методика повышения показателей качества обслуживания сети специального назначения за счет адаптивного управления скоростями логических соединений в сети воздушной радиосвязи, использующей CSMA-метод доступа.

Ключевые слова — информационно-вычислительные сети, системы массового обслуживания, квазистационарный поток заявок на обслуживание, эффективность управления авиационными комплексами.

Список лит.: 6 назв.

УДК 519.687.1

Virtual applications for grid-computing

Pervin A. Yu., Moskovskiy A. A. IUS, 2008. N 6. P. 36–43.

We have devised an approach for automated, dynamic resource management of applications running on a computational cluster. The following applications have been created and tested: computing oriented and web oriented. Performance-resource dependences of these applications were studied. We present an ongoing research on dynamic resource allocation, involving optimal control methods.

Keywords — virtual machines, virtual services, service level convention, optimal control.

Refs: 22 titles.

УДК 004.728.3.057.4

Contention-based polling usage in broadband wireless networks

Andreev S. D., Nilova A. V., Tyurlikov A. M. IUS, 2008. N 6. P. 44–53.

This paper addresses the efficiency of the contention-based polling mechanisms at the bandwidth reservation stage of IEEE 802.16 standard operation. A general proposition about «symmetrical» user grouping in the random multiple access system is proved. Broadcast and multicast contention-based polling mechanisms are analyzed, for which the performance of the truncated binary exponential «backoff» algorithm is optimized given different system settings.

Keywords — broadband networks, IEEE 802.16, reservation methods, multiple access, truncated binary exponential «backoff» algorithm.

Refs: 22 titles.

УДК 519.872

The adaptive management of the logical channel speed in the carrier sensitive multiple access radio net

Makarenko S. I. IUS, 2008. N 6. P. 54–58.

The article presents an increased QoS special net method with the use of the adaptive management of the logical channel speed in the CSMA radio net.

Keywords — information computing nets, mass service systems, quasi-stationary request flow, effectiveness of aviation complexes control.

Refs: 6 titles.

УДК 004.9

Автоматизированное распознавание электроэнцефалограмм с использованием метода анализа фрактальной динамики

Полонников Р. И., Вассерман Е. Л., Карташев Н. К. Информационно-управляющие системы, 2008. № 6. С. 59–61.

Приводятся результаты применения признаков, рассчитанных методом анализа фрактальной динамики, для обучаемой классификации электроэнцефалограмм. Путем соотнесения с результатами, полученными на случайных выборках, показана значимость положительных результатов распознавания.

Ключевые слова — цифровая электроэнцефалография, метод анализа фрактальной динамики, распознавание функциональных состояний, случайный поиск с адаптацией.

Список лит.: 4 назв.

УДК 533.9

Метод активной многомодовой диагностики плазмы

Кордеро Л. Информационно-управляющие системы, 2008. № 6. С. 62–64.

Ставится задача определения пространственного распределения концентрации электронов бортовой плазмы. Предлагается использовать решение обратной задачи Штурма—Лиувилля. Исходными данными являются измерения на нескольких модах значения комплексных коэффициентов отражения в плоскости апертуры бортовой антенны. Рассматривается алгоритм восстановления распределения концентрации электронов.

Ключевые слова — бортовая плазма, концентрация электронов, диагностика плазмы.

Список лит.: 3 назв.

УДК 004.9

Automated recognition of electroencephalograms using the method of analysis of fractal dynamics

Polonnikov R. I., Wasserman E. L., Kartashev N. K. IUS, 2008. N 6. P. 59–61.

The results of employing the method of analysis of fractal dynamics characteristics to encephalograms recognition are presented. The significance of positive results is shown by means of comparison with results of recognition of random grouped samples.

Keywords — digital electroencephalography, method of analysis of fractal dynamics, functional states recognition, adaptive random search.

Refs: 4 titles.

УДК 533.9

The active method of multiple mode plasma diagnostic

Kordero L. IUS, 2008. N 6. P. 62–64.

The problem of defining the spatial distribution of concentration of electrons of on board plasma is posed. It is offered to use the decision of the reverse Sturm-Liouville problem. Initial data is the values of complex factors of the reflection measured in several modes in a plane of the aperture of the onboard aerial. An algorithm of restoration of distribution of concentration of electrons is discussed.

Keywords — onboard plasma, electron concentration, plasma diagnostic.

Refs: 3 titles.

СОДЕРЖАНИЕ ЖУРНАЛА «ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ» за 2008 г. [№ 1–6]

	№	Стр.
Акимцев В. В., Мещерин А. Н. Цифровой принимаемый сигнал импульсных РЛС обзора и сопровождения и его возможности по разрешению целей по дальности	1	43
Акош А. Теоретическое исследование искажающихся муаровых поверхностей	5	2
Алсынбаева Л. Г. E-Learning в системах корпоративного обучения в России: тенденции, проблемы, перспективы	4	49
Аль-Аммори Али. Оценка эффективности способов повышения достоверности данных в информационно-управляющих системах при информационном резервировании	6	16
Ананьев М. Ю., Гортинская Л. В., Молдовян Н. А. Протоколы коллективной подписи на основе свертки индивидуальных параметров	2	22
Андреев С. Д., Нилова А. В., Тюрликов А. М. Использование конкурентного опроса в широкополосных беспроводных сетях	6	44
Аушева В. А., Юлдашев З. М. Технология и автоматизированный комплекс для оценки концентрации ионов в биосубстратах	1	50
Бронштейн И. Г., Старченко А. П., Унчун Чо. Разработка методики и исследование электронной системы стабилизации изображения видеокамеры	1	7
Бузюкова И. Л., Яновский Г. Г. Методика расчета вероятностно-временных характеристик интеллектуальных сетей связи	1	17
Бураков В. В. Способы формальной спецификации принципов проектирования программных средств	5	22
Ведерников Ю. В., Сафронов В. В. Метод многокритериального ранжирования сложных систем при различных видах неопределенности исходных данных	3	32
Виллевальде А. Ю., Юлдашев З. М. Метод предварительной обработки медицинских малоконтрастных изображений	5	41
Воробьев С. Н., Лазарев И. В. Алгоритм распознавания конфигураций звезд	2	2
Галанов А. И., Молдовян Н. А., Еремеев М. А. Множественная подпись: новые решения на основе понятия коллективного открытого ключа	1	34
Гордеев А. В., Кобзарев Н. А. Метод получения оценок времени выполнения на ранних этапах проектирования сложных распределенных приложений	3	5
Городецкий А. Е., Тарасова И. Л. Алгебраические методы получения и преобразования изображений при технической диагностике сложных систем в условиях неполной определенности (Часть 1)	5	10
Городецкий А. Е., Тарасова И. Л. Алгебраические методы получения и преобразования изображений при технической диагностике сложных систем в условиях неполной определенности (Часть 2)	6	22
Гуров В. С., Мазин М. А., Шалыто А. А. Автоматическое завершение ввода условий в диаграммах состояний	1	24
Дернова Е. С., Избаш В. И., Гурьянов Д. Ю., Молдовян Д. Н. Алгоритмы электронной цифровой подписи на основе сложности извлечения корней в конечных группах известного порядка	5	33
Егоров К. В., Шалыто А. А. Методика верификации автоматных программ	5	15
Зикратов И. А., Зикратова Т. В. Оптимизация зоны покрытия систем сотовой связи на загородных участках местности методом стохастического программирования	4	39
Калиниченко А. Н., Юрьева О. Д. Влияние частоты дискретизации ЭКГ на точность вычисления спектральных параметров variability сердечного ритма	2	46
Калюжный М. В., Филатова Н. Н. Коррекция просодических характеристик речевого сигнала в средствах реабилитации незрячих и слабовидящих	1	54
Князев Е. Г., Шопырин Д. Г. Использование автоматизированной классификации изменений программного кода в управлении процессом разработки программного обеспечения	2	15
Ковалев Д. В., Шаповалов В. В. Архитектура процессора метаданных	3	39
Ковальчук С. В., Иванов С. В., Кольхматов И. И., Бухановский А. В. Особенности проектирования высокопроизводительных программных комплексов для моделирования сложных систем	3	10
Колбанев М. О., Татарникова Т. М., Малков К. О. Подход к организации адаптивного согласующего центра корпоративной сети	3	28
Коновалов А. С., Якимовский Д. О. Управление электроприводами космических аппаратов в особых режимах	6	26
Кордеро Л. Метод активной многомодовой диагностики плазмы	6	62
Коржава Г. А., Подолекин Ю. Ф., Бредун И. Л. Кроссиндикация групповой помехи в моноимпульсной РЛС	4	2
Красильников Н. Н. Принципы обработки изображений, основанные на учете их семантической структуры	1	2
Красюк В. Н., Бестугин А. Р., Рыжиков М. Б. Микрополосковая сферическая активная фазированная антенная решетка с электронным сканированием путем перекоммутации излучателей	4	34
Кубайчук А. Б. Структура медицинской информационной системы многопрофильного скрининга с унифицированным формальным представлением медицинского обеспечения	2	42
Лившиц И. Л., Пашковский М. А., Бронштейн И. Г., Сергеев М. Б., Унчун Чо. Характеристики программного обеспечения для проектирования дифракционно-ограниченных оптико-электронных систем	3	19

Макаренко С. И. Адаптивное управление скоростями логических соединений в канале радиосвязи множественного доступа	6	54
Мальцев Г. Н., Стогов Г. В. Двумерное преобразование Хаара и особенности его вычисления при обработке оптических изображений	3	2
Мальцев Г. Н., Теличко В. В. Оптимизация состава средств защиты информации в информационно-управляющей системе с каналами беспроводного доступа на основе графа реализации угроз	4	29
Марковский С. Г., Тюрликов А. М. Использование идентификаторов абонентов для резервирования канала множественного доступа	2	28
Машканцев И. В., Соложенцев Е. Д. Основы логико-вероятностной теории риска с группами несовместных событий	2	50
Минченков В. О., Сергеев А. В., Тюрликов А. М. Цветовое преобразование для сжатия компьютерных и синтетических изображений без потерь	5	26
Моисеенко А. С., Матьяш В. А. Разработка методов скрещивания эпох для предотвращения сходимости генетического алгоритма	4	9
Молодяков С. А. Оптоэлектронные процессоры с ПЗС-фотоприемниками. Конвейерная обработка сигналов	6	2
Никифоров С. Н. Обработка реакций дискретных объектов при диагностировании	5	6
Новиков Ф. А., Степанян К. Б. Использование порождающего программирования при реализации языка описания диаграмм	6	32
Обухова Н. А., Тимофеев Б. С. Сегментация и сопровождение объектов в сложных условиях видеонаблюдения	6	9
Пахарьков Г. Н., Хаймур М. Х. О медико-техническом оснащении службы скорой медицинской помощи	5	45
Первин А. Ю., Московский А. А. Виртуальные приложения для грид-вычислений	6	36
Переварюха А. Ю. Нелинейная динамическая модель системы запас-пополнение	2	9
Писаренко К. Э. Управление показателями качества образования	5	58
Полонников Р. И., Вассерман Е. Л., Карташев Н. К. Автоматизированное распознавание электроэнцефалограмм с использованием метода анализа фрактальной динамики	6	59
Савищенко Н. В. Помехоустойчивость когерентного приема многопозиционных сигнальных конструкций при разнесенном приеме и общих замираниях параметров канала	1	37
Сальников А. В., Лившиц И. Л., Унчун Чо. Повышение эффективности использования алгоритма композиции оптических систем с применением современных информационных технологий	4	53
Семенов Н. Н. Фрактальный обнаружитель эхо-сигнала	3	54
Семенов Н. Н., Леонтьев А. Е. Спектральные методы обработки пространственных данных для классификации целей	1	12
Семенцов С. Г. Моделирование передаточной функции вторичного канала систем активного гашения шума	4	18
Смирнова М. С. Методы повышения эффективности процесса нанесения припойных паст в технологии поверхностного монтажа	5	54
Сольницев Р. И., Коршунов Г. И., Шабалов А. А. Моделирование замкнутой системы управления «Природа-техногеника»	2	36
Сотников А. Д. Инфокоммуникационные системы и их модели для здравоохранения	3	46
Тазетдинов А. Д. Автоматный подход в построении компьютерных обучающих диалогов	4	42
Толмачев А. С. Язык моделирования бизнес-процессов BPDЛ	4	23
Федоренко С. В. Простой алгоритм декодирования алгебраических кодов	3	23
Фролова Е. А. Внутренний аудит как составляющая системы менеджмента качества вуза	5	56
Шишлаков В. Ф., Шишлаков Д. В., Цветков С. А. Синтез и моделирование автономной электроэнергетической установки	4	14
Аннотации	1	62
Аннотации	2	61
Аннотации	3	61
Аннотации	4	62
Аннотации	5	65
Аннотации	6	69
Сведения об авторах	1	58
Сведения об авторах	2	58
Сведения об авторах	3	57
Сведения об авторах	4	58
Сведения об авторах	5	61
Сведения об авторах	6	65
XII Международный симпозиум по проблеме избыточности в информационных системах	5	60
Международная научная конференция «Дни кодирования в Санкт-Петербурге»	4	57