

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Российская академия наук

Московский физико-технический институт  
(государственный университет)

Российский фонд фундаментальных исследований

Федеральная целевая программа

«Научные и научно-педагогические кадры инновационной России»  
на 2009–2013 годы

Фонд содействия развитию малых форм предприятий  
в научно-технической сфере

## ТРУДЫ 53-й НАУЧНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ МФТИ

Современные проблемы  
фундаментальных и прикладных наук

Часть I  
Радиотехника и кибернетика

Том 1



Москва–Долгопрудный  
МФТИ  
2010

УДК 004:51:621.3:537.8

ББК 32.97

T78

T78 Труды 53-й научной конференции МФТИ «Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук». Часть I. Радиотехника и кибернетика. Том 1. — М.: МФТИ, 2010. — 178 с.  
ISBN 978-5-7417-0322-9

В сборник включены результаты фундаментальных и прикладных исследований студентов, аспирантов, преподавателей и научных сотрудников МФТИ, а также ряда научных и учебных организаций. Они представляют интерес для специалистов, работающих в области вычислительных и инфокоммуникационных технологий, обработки и защиты информации, систем спутниковой связи, радиолокации.

УДК 004:51:621.3:537.8

ББК 32.97

ISBN 978-5-7417-0322-9

© ГОУ ВПО «Московский физико-технический институт (государственный университет)», 2010

## Программный комитет

*Кудрявцев Н.Н.*, чл.-корр. РАН, ректор института — **председатель**  
*Кондранин Т.В.*, профессор, первый проректор — **зам. председателя**  
*Стрыгин Л.В.*, доцент — **учёный секретарь конференции**

*Алфимов М.В.*, академик, директор Центра фотохимии РАН  
*Андреев А.Ф.*, академик РАН, директор ИФП РАН  
*Беллев С.Т.*, академик РАН, зав. кафедрой МФТИ  
*Велихов Е.П.*, академик РАН, президент РНЦ «Курчатовский институт»  
*Гуляев Ю.В.*, академик РАН, директор ИРЭ РАН  
*Дмитриев В.Г.*, чл.-корр. РАН, зав. кафедрой МФТИ  
*Иванников В.П.*, академик РАН, директор ИСП РАН  
*Коротеев А.С.*, академик РАН, директор Центра им. М.В. Келдыша  
*Кузнецов Н.А.*, академик РАН, зав. кафедрой МФТИ  
*Макаров В.Л.*, академик-секретарь Отделения ОН РАН, дир. ЦЭМИ РАН  
*Петров А.А.*, академик РАН, заведующий отделом ВЦ РАН  
*Фортвов В.Е.*, академик-секретарь Отделения ЭММПУ РАН  
*Патон Б.Е.*, академик, президент НАН Украины  
*Шпак А.П.*, академик, первый вице-президент НАН Украины  
*Черепин В.Т.*, чл.-корр. НАН Украины, директор ФТЦ НАНУ  
*Жданок С.А.*, академик-секретарь Отделения ФТН НАН Беларуси

*Гаричев С.Н.*, д.т.н., декан ФРТК  
*Трунин М.Р.*, д.ф.-м.н., декан ФОПФ  
*Негодяев С.С.*, к.т.н., декан ФАКИ  
*Грознов И.Н.*, доцент, декан ФМБФ  
*Тодуа П.А.*, профессор, декан ФФКЭ  
*Вышинский В.В.*, профессор, декан ФАЛТ  
*Шананин А.А.*, профессор, декан ФУПМ  
*Леонов А.Г.*, профессор, декан ФПФЭ  
*Кривцов В.Е.*, доцент, декан ФИВТ  
*Ковальчук М.В.*, чл.-корр. РАН, декан ФНБИК  
*Деревнина А.Ю.*, д.т.н., декан ФИВС  
*Кобзев А.И.*, профессор, декан ФГН  
*Алёхин А.П.*, профессор, зав. кафедрой  
*Астапенко В.А.*, д.ф.-м.н., зав. кафедрой  
*Белоусов Ю.М.*, профессор, зав. кафедрой  
*Бугаёв А.С.*, академик РАН, зав. кафедрой  
*Щелкунов Н.Н.*, доцент, зав. кафедрой  
*Гуз С.А.*, доцент, зав. кафедрой  
*Иванов А.П.*, профессор, зав. кафедрой  
*Кваченко А.В.*, к.т.н., зав. кафедрой  
*Нижинский В.А.*, к.ф.-м.н., зав. кафедрой  
*Луккин Д.С.*, профессор, зав. кафедрой  
*Максимычев А.В.*, д.ф.-м.н., зав. кафедрой  
*Петров И.Б.*, профессор, зав. кафедрой  
*Половинкин Е.С.*, профессор, зав. кафедрой  
*Сон Э.Е.*, чл.-корр. РАН, зав. кафедрой  
*Тельнова А.А.*, доцент, зав. кафедрой  
*Трухан Э.М.*, профессор, зав. кафедрой  
*Холодов А.С.*, чл.-корр. РАН, зав. кафедрой  
*Энтов Р.М.*, академик РАН, зав. кафедрой

## Пленарное заседание

*С.Ф. Боев*<sup>1,2</sup>, *Д.Д. Ступин*<sup>2</sup>

stupin@rtisystems.ru

<sup>1</sup> АФК «Система»

<sup>2</sup> Концерн «Радиотехнические и информационные системы»

### Дальняя радиолокация: состояние, проблемы и перспективы

1. Дальняя радиолокация, под которой понимается радиолокация, решающая задачи обнаружения и наблюдения баллистических и космических объектов, является одним из важнейших направлений научно-технической деятельности Концерна «Радиотехнические и Информационные Системы» («РТИ Системы»). Образованный в июле 2000 года на базе Радиотехнического института имени академика А.Л. Минца (РТИ) и НИИ Дальней Радиосвязи (НИИДАР) Концерн «РТИ Системы» является лидером в стране по мощной надгоризонтной и загоризонтной радиолокации.
2. Одним из главных условий поддержания своего лидерства в освоенных научно-технологических направлениях и быстрого развития новых перспективных направлений Концерн считает плотное сотрудничество с ведущими ВУЗами страны. Сегодня различными формами сотрудничества Концерн «РТИ Системы» и его предприятия связаны более чем с 15-ю вузами в России и за рубежом. Очевидно, что одним из наиболее приоритетных мы рассматриваем сотрудничество с Физтехом, флагманом российских вузов и безусловным лидером в области физико-технических наук и технологий.
3. Дальняя радиолокация продолжает быть наиболее значимым направлением деятельности Концерна, и, несмотря на достаточно динамичное развитие других научно-технических направле-

ний (телекоммуникации, системы управления и др.), такая ситуация сохранится в ближайшие 10–15 лет. Основная причина этого — развитие информационных средств (прежде всего радиолокационных), решающих задачи ракетно-космической и воздушно-космической обороны (соответственно РКО и ВКО).

4. РЛС РКО — это средства наблюдения за стартами и полетами БР, орбитами ИСЗ, другими баллистическими и космическими объектами. Эти РЛС решают задачи в интересах системы предупреждения о ракетном нападении (СПРН), системы контроля космического пространства (СККП), системы противоракетной обороны (ПРО) и некоторых других. Наиболее «яркими» представителями РЛС данного класса, созданными и введенными в эксплуатацию в конце прошлого — начале нынешнего века, следует назвать:

- РЛС «Дарьял», самую мощную в мире;
- РЛС «Волга», первую РЛС с полностью цифровой ФАР;
- РЛС «Крона», самую «высокоточную» в своем классе;
- РЛС «Дон», самую информативную в мире.

5. Эволюция информационных радиолокационных средств РКО полностью отражает развитие техники и технологий РЛС в стране и мире. От первых РЛС дальнего обнаружения с фазочастотным управлением лучом антенны к полностью цифровым фазированным антенным решеткам, от простейших согласованных фильтров к системам обработки сложных высокоинформативных сигналов, от больших энергоемких инженерных комплексов к технологиям высокой заводской готовности (ВЗГ) и перебазируемым радиолокационным комплексам — путь развития радиолокационной техники. Перспектива развития РЛС РКО определена на 20 лет, при этом объем научно-технических проблем, требующих своего решения, только увеличивается.

6. Таким образом, проблематика РЛС дальнего обнаружения (ДО) имеет следующие отличительные черты:

- востребованность на государственном уровне;
- наличие хорошей научно-технической перспективы;

- наличие массы нерешенных и требующих решения системных, научно-технических и технологических проблем, что является основой для интереса молодого поколения ученых и инженеров.

7. Приведенная ниже (рис. 1) укрупненная структурная схема РЛС ДО характеризует РЛС как большой автоматизированный аппаратно-программный комплекс, в котором каждый элемент представляет собой сложную техническую систему.

8. Для анализа всего спектра научно-технических проблем, требующих своего решения в радиолокации ДО, целесообразно рассмотреть задачи, решаемые РЛС, включая эволюцию этих задач в течение всего времени развития этого научно-технического направления.

- В 40–60 годы РЛС играли роль обычных «сенсоров», возможности которых ограничивались обнаружением объектов и оценкой его примерного местоположения, то есть констатацией факта наличия объекта в зоне действия РЛС.
- В 70–80 годы РЛС стали полноценными информационными средствами, способными обнаруживать объекты и определять параметры их движения. Именно в этот период РЛС ДО решают задачи информационного обеспечения систем РКО, однако существующий уровень развития технологий (прежде всего — систем обработки информации) не позволял решать эти задачи в полном объеме.
- Начиная с 90-х годов прошлого века и по настоящее время РЛС ДО рассматриваются уже как многофункциональные информационные средства, способные решать задачи оценки ситуации в зоне ответственности РЛС и обеспечивать информацией о ситуации (с возможностью соответствующего анализа этой ситуации и, возможно, прогноза ее развития) систем любого уровня, вплоть до стратегических. Этому, в частности, способствовало и развитие всего спектра технологий, используемых в дальней радиолокации.

9. Соответственно решаемым задачам менялись возможности РЛС по оценке различных параметров баллистических и космических объектов. От простой оценки положения объекта и

примерной оценки его относительной «яркости», которые обеспечивали «сенсоры», к оценкам параметров орбит, ЭПР, параметров конфигурации всех наблюдаемых в зоне действия РЛС объектов, характеристик помеховой обстановки в зоне и т.п., которые характерны для современных РЛС. Увеличение объема информации, которую может получить РЛС при наблюдении объектов, связано с повышением ее информационно-энергетических характеристик, то есть увеличением объема информации, получаемой при фиксированном энергетическом ресурсе, выделяемом на наблюдение конкретного объекта.

10. Опыт создания и эксплуатации РЛС ДО показывает четкую зависимость между энергетикой РЛС, выделяемой на наблюдение цели, и информацией, которую по этой цели можно получить. При этом объем информации имеет ограничения «сверху», и этот факт позволяет вводить понятия оптимальных режимов наблюдения целей, то есть когда объем получаемой информации является «разумным» для выделяемой энергетике и позволяет вводить соответствующие ограничения для режимов наблюдения.
11. В целом информационные возможности РЛС (ее информативность) определяются тремя параметрами: полоса частот  $F$  (характеризует разрешение и точности оценок дальности), пространственная «база»  $B$  (характеризует разрешение и точности по угловым координатам) и длительность  $T$  (характеризует разрешение и точности по производным дальности). Эти три параметра определяют некий информационный параллелепипед в пространстве параметров  $F$ - $B$ - $T$ , размеры и объем которого и определяют информативность РЛС, а следовательно, и ее возможности по решению задач в интересах различных систем.
12. При проектировании и создании РЛС ДО важное значение имеют некоторые принципиальные ее характеристики и параметры, среди которых необходимо выделить:
  - частотный диапазон работы РЛС (рабочие длины волн), который должен обеспечить максимальную информативность;
  - этапы наблюдения целей (поиск-обнаружение-наблюдение и т.д.), оптимизирующие характеристики решения локатором своих задач и их взаимосвязка.

13. Реальным «носителем» информации, получаемой РЛС на любом этапе наблюдения объектов, является эхо-сигнал, пришедший на РЛС от цели. При этом информация об объекте заключена как в законе изменения амплитуды сигнала, так и в законе изменения фазы. При этом амплитудные измерения всегда являлись основным (и, как показывает практический опыт, весьма емким) источником информации, позволяющим оценивать как координатные, так и некоординатные параметры объектов.
14. Фазовые измерения эхо-сигнала также являются очень емким источником информации об объекте, при этом использование фазовой информации, вследствие чувствительности фазы к изменению ракурса объекта в течение его облучения радиолокационным сигналом, позволяет выйти на качественно новый уровень информативности РЛС. На сегодня возможности когерентных сигналов в практической радиолокации ДО используются не более чем на 20%, что определяет одно из наиболее перспективных направлений развития радиолокации.
15. Рассматривая наиболее значимые перспективы развития техники и технологии РЛС ДО, можно сделать вывод, что это развитие должно идти по пути повышения информативности РЛС, ее помехозащищенности и живучести на основе увеличения «объема» информационного параллелепипеда в пространстве параметров ( $F$ - $B$ - $T$ ).

**Выводы.** 1. Радиолокация, как системное научно-техническое направление востребована и будет востребована в ближайшие десятилетия.

2. На каждом этапе развития радиолокационной техники необходимо решать значительный объем научно-технических, технологических и других задач.



Рис. 1. Структурная схема РЛС

## Секция высокопроизводительных вычислительных систем

УДК 004.421

А.Ю. Зенов, Н.В. Мясникова  
superlobzik@ya.ru, genok123@mail.ru

Пензенский государственный университет

### Времяимпульсная модуляция для решения задач вычисления спектральных характеристик сигнала

Несмотря на применение современной вычислительной техники, все более актуальной становится задача минимизации вычислительных затрат на реализацию всевозможных алгоритмов.

Одним из таких алгоритмов является дискретное преобразование Фурье (ДПФ), которое широко применяется в алгоритмах цифровой обработки сигналов (сжатии изображений в JPEG, сжатии звука в MP3 и др.), а также в других областях, связанных с анализом частот в дискретном сигнале. Однако ДПФ является достаточно трудоемким с вычислительной точки зрения процессом. Для решения данной проблемы был разработан и реализован алгоритм быстрого преобразования Фурье (БПФ). Но алгоритм БПФ реализуется достаточно сложно алгоритмически.

Таким образом, крайне актуально стоит проблема создания способов спектрального анализа данных, отличающихся значительным снижением их трудоемкости, приемлемой для практических нужд точностью и простотой реализации.

Предлагается [1, 2] использовать времяимпульсную модуляцию (ВИМ), а конкретнее ее разновидность — фазовую модуляцию, при которой изменяется интервал  $T_i = f(x(t_i))$  между  $i$  и  $i + 1$  импульсами, где  $x(t_i)$ ,  $i = 0, 1, \dots, n$  — исследуемый сигнал. Тогда момент появления импульса определяется выражением  $tt_i = \sum_{k=0}^{i-1} T_k$ . Соответственно спектр такой последовательности (ВИМ спектр) известен:  $S_t(f_k) = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} \exp(-j2\pi f_k tt_i)$ .

Экспериментально доказано, при достаточно больших значениях  $m$  спектр ВИМ-сигнала  $S_t(f)$  по форме совпадает со спектром  $S_x(f)$  исходного сигнала  $x(t)$ , но по сравнению с исходным спектром он сжат, то есть при определенных условиях спектр модулированного сигнала совпадает со спектром  $x(at)$ , который с учетом нормирования определяется как  $aS(f/a)$ , причем  $a \ll 1$ . Следовательно, спектральный анализ может быть сведен к вычислению по формуле

$$S_t(k) = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} m \exp(-j2\pi k \frac{tt_i}{tt_n}) = \frac{m}{n} \sum_{i=0}^{n-1} \exp(-j2\pi k \frac{tt_i}{tt_n}).$$

На рис. 1 показан зашумленный сигнал вида  $x_i = \sin(2\pi f_1 \Delta t i) + 2,4 \cdot \sin(2\pi f_2 \Delta t i)$ ,  $i = 0, \dots, n-1$ . На рис. 2 показан спектр этого сигнала, вычисленный стандартными способами и ВИМ-спектр. Как видно, спектры совпадают, это обеспечивается малым индексом модуляции. Это позволяет вычислять спектр без операций умножения. Возможны и другие подходы.

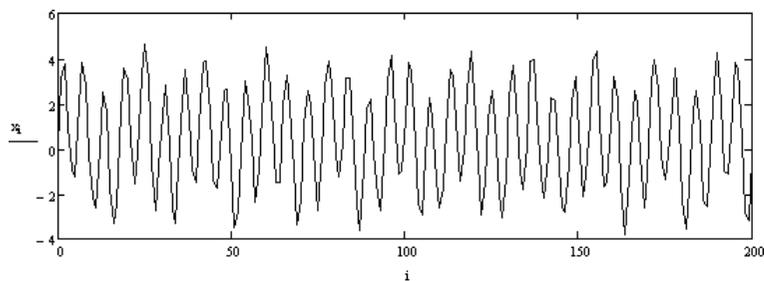


Рис. 1

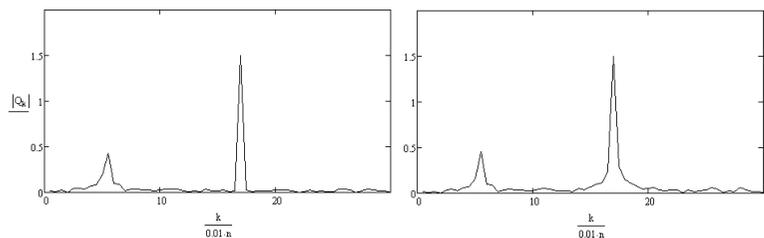


Рис. 2

## Литература

1. Мясникова Н.В. Быстрое преобразование Фурье на основе импульсной модуляции сигнала // Датчики систем измерения, контроля и управления: Межвуз. сб. науч. тр. — 2000. — № 20. — С. 58–64.
2. Мясникова Н.В. Спектральный анализ сигналов по временным параметрам // Известия Вузов. Поволжский регион. Технические науки. — 2002. — № 1.

УДК 004.318

М.В. Исаев

isaev\_m@mcst.ru

Московский физико-технический институт  
(государственный университет)  
ЗАО «МЦСТ»

## Основные тенденции в архитектуре высокопроизводительных многоядерных процессоров

При подготовке обзора автором проанализированы архитектурные особенности многоядерных микропроцессоров с количеством ядер 8 и более: AMD Opteron серии Magny-Cours, Intel Nehalem-EX, IBM Power7, IBM Cell, Sun UltraSPARC T3, а также ещё не вышедший микропроцессор AMD Bulldozer, Intel Larrabee и не прошедший далее стадии разработки Sun Rock. Были рассмотрены использованные в них основные технические решения и выделены тенденции, которые наблюдаются в разработках, ориентированных на современные высокопроизводительные приложения.

Наращивание числа ядер в микропроцессоре становится повсеместным трендом, а соединение процессоров в систему из 4–32 кристаллов с помощью межпроцессорных LVDS-интерфейсов, в которых используется достаточно большая, порядка 6,4 ГТ / с, скорость (последние версии стандарта HyperTransport от AMD и IBM и QPI от Intel), практически является стандартом де-факто. При этом очень остро встают вопросы когерентности в системе. На данный момент

почти все решения, кроме IBM Cell, предлагают аппаратную поддержку когерентности. Но чтобы обеспечивать заявленную производительность в реальных приложениях, приходится достаточно сильно расширять интерфейсы, обеспечивая один контроллер памяти на два-три ядра. То есть для создания восьмиядерного процессора гармоничным кажется использование четырех (и точно — не менее трёх) каналов памяти, иначе интерфейс с памятью становится узким местом. При выстраивании механизма когерентности происходит усложнение протоколов. Чтобы сократить служебный трафик между процессорами, объекты обеспечения когерентности делятся на регионы, а запросы рассылаются ступенчато (IBM Power и Intel Nehalem-EX). Вкупе с иерархией регионов используются директории для адресации когерентных запросов вместо рассылки ширококестельных. Протоколы когерентности дорабатываются и дополняются состояниями, которые позволяют меньше обращаться за данными в память и забирать Shared-копию данных из соседнего процессора при её наличии (MESIF-протокол Intel и когерентный протокол Larrabee) [2]. Ядра обычно имеют некую общую структуру данных, L3-кэш, хотя доступ к разным его частям обычно несимметричен (кроме IBM Cell, у которого используется DMA-память). Разделяется локальная часть, доступ к которой выполняется достаточно быстро, и остальные части с более медленным доступом. Так как появляется кэш-память третьего уровня, то L2-кэш обычно стараются уменьшить (часто используется лишь кэш-память объемом 256 Кб, общая для данных и кодов команд), при этом L1-кэш составляет обычно по 32 Кб для данных и для команд, суммарно — 64 Кб. Объем L3 обычно составляет 1–2 Мб на ядро. Большой удельный объем используется лишь фирмами, которые способны применить уникальную технологию для изготовления памяти столь большого объема (технология eDRAM у IBM) [3].

Кольцевые шины на данный момент используются в нескольких процессорах. Во-первых, процессоре IBM Cell, но в нем аппаратно не поддерживается когерентность, и шина используется только для обмена данными. Во-вторых, в процессоре Intel Larrabee — в этом случае для шины реализована аппаратная поддержка когерентности, а передаются по ней адресная часть, данные и служебная информация. И, наконец, в процессоре Intel Nehalem-EX кольцевая шина лишь связывает части L3-кэша по данным. Также кольцевые шины применялись в прошлом в графических чипах AMD, начиная с серии R600, но впоследствии от них было решено отказаться. Они также исполь-

зовались только для передачи данных, когерентность между ядрами не поддерживалась.

### Литература

1. Conway P., Kalyanasundharam N., Donley G., Lepak K., Hughes B. Cache Hierarchy and Memory Subsystem of the AMD Opteron Processor // IEEE Micro. — 2010. — V. 30, N. 2. — P. 16–29.
2. Hum H.H.J. [et al.] Forward state for use in cache coherency in a multiprocessor system // US Patent 6922756. — 2005.
3. Kalla R., Sinharoy B., Starke W.J., Floyd M. Power7: IBM's Next-Generation Server Processor // IEEE Micro. — 2010. — V. 30, N. 2. — P. 7–15.

УДК 004.318

*А.С. Кожин*

as\_kozhin@mail.ru

Московский физико-технический институт  
(государственный университет)  
ЗАО «МЦСТ»

### Аппаратная поддержка виртуализации вычислительных ресурсов (аналитический обзор)

Технология виртуализации процессоров с различными операционными системами на одном мейнфрейме впервые была реализована в 1960-х годах компанией IBM и нашла достаточное применение. К 1980-му году интерес к виртуализации постепенно ослаб ввиду появления и быстрого распространения персональных компьютеров и снова возник только в начале нового тысячелетия.

Причиной возросшего внимания стало стремление к более эффективному использованию вычислительных мощностей серверов. Постоянное расширение инфраструктуры ИТ привело к значительному увеличению затрат на ее поддержку, притом что средний коэффициент загрузки серверов к тому времени составлял всего 25%. Внедрение программной виртуализации позволяло запускать несколько пользовательских операционных систем одновременно на одном сервере или формировать серверный кластер из множества

компьютеров для решения одной задачи. Такая консолидация вычислительных ресурсов заметно увеличила эффективность вычислительных комплексов.

Повсеместное оснащение серверов средствами программной виртуализации подтолкнуло Intel и AMD добавить в свою архитектуру ее аппаратную поддержку. Предложенные технологии получили названия Intel VT и AMD Pacifica.

В решении Intel гипервизор (монитор виртуальных машин) запускается как приложение базовой операционной системы, а работа с виртуальными машинами осуществляется в режиме VMX. Код гостевой ОС выполняется как непривилегированный и при перехвате потенциально опасной инструкции, которая может повлиять на работу остальных ОС, управление передается гипервизору, который программно имитирует результат ее выполнения. Для каждой виртуальной машины вводится специальная структура данных VMCS, содержащая информацию о состоянии гипервизора и этой машины, условия и причины последнего выхода. Все эти структуры хранятся в оперативной памяти и описываются достаточно сложной машиной конечных состояний. Всего в режиме VMX добавилось 10 новых инструкций, шесть из которых управляют структурой VMCS.

Со своей стороны, компания AMD ввела 8 команд, причем три из них служат для ускорения переключения между гипервизором и виртуальными машинами. Базовая ОС не используется, сам гипервизор уже является системным кодом и исполняет роль ядра некоторой основной операционной системы. Виртуальные машины также описываются структурой данных VMCSB, но в отличие от предложенной Intel структуры VMCS она не содержит состояния гипервизора. Для него выделяется отдельная внутренняя память процессора, что позволяет избежать многочисленных копий поля состояния, упрощает работу со структурами VMCSB и уменьшает вероятность ошибки при переходах.

Помимо расширения системы команд оба производителя ввели для виртуальных машин технологии аппаратной поддержки ввода-вывода: Intel VT-d и AMD IOMMU. Основные примененные в них решения совпадают и относятся к трансляции виртуальных адресов и обеспечению доступа к памяти по DMA без вмешательства гипервизора.

При трансляции виртуальных адресов используется двухуровневая схема. На первом этапе адрес преобразуется из виртуального в физический с помощью собственной таблицы страниц виртуальной

машины. Он находится в виртуальной памяти хост-машины и на следующем этапе транслируется в ее физический адрес с помощью «теневой» таблицы страниц, недоступной виртуальным машинам. Полное преобразование записывается в TLB. Для того чтобы привязать все эти записи к конкретным машинам и не очищать буфер после каждого переключения между гостевыми ОС, к каждой строке TLB приписывается тэг-идентификатор. Механизм доступа по DMA добавляет вектор исключения устройств, который хранится в оперативной памяти. Каждый бит этого вектора определяет разрешение для внешнего устройства на доступ к соответствующей 4-КБ странице памяти.

Большинство из идей, использованных в своих технологиях аппаратной поддержки Intel и AMD, были предложены еще в 1960–1970 гг. компанией IBM. Однако и сегодня они позволяют существенно повысить быстродействие виртуальных машин и приблизить его к быстродействию систем без виртуализации.

### Литература

1. Intel 64 and IA-32 Architectures Software Developer's Manual // Intel. — 2010. — V. 3B, N. 2.
2. AMD64 Architecture Programmer's Manual // AMD. — 2009. — V. 2.
3. AMD I / O Virtualization Technology (IOMMU) Specification // AMD. — 2009.

УДК 004.318

*Ю.А. Недбайло*

nonsens@mcst.ru

Институт электронных управляющих машин  
ЗАО «МЦСТ»

### Особенности реализации поддержки когерентности кэшей в системах на кристалле «Эльбрус-S» и «Эльбрус-2S»

В системе «Эльбрус-S», предназначенной для использования в многопроцессорных NUMA-системах, реализован механизм поддержки когерентности кэшей по протоколу MOESI, используемому также в системах AMD [1]. У этого механизма есть несколько особенностей.

Первой особенностью является проблема перехода в состояние Exclusive в результате операции считывания. В процессорах серии «Эльбрус» может возникать ситуация, при которой в память выходят два запроса на считывание по одному адресу, после которых также была запись по этому адресу, оставшаяся в буфере кэша, и в этом случае получение первым запросом данных со статусом Exclusive может привести к нарушению консистентности. Основных решений этой проблемы известно два: более строгое упорядочивание обращений в память и отказ от перехода в состояние Exclusive в результате запроса на считывание. Каждое из этих решений влечёт за собой потерю производительности на эталонных тестах порядка 1%. Автором доклада предложен механизм, позволяющий при небольших затратах оборудования обнаруживать проблемную ситуацию и отменять установку статуса Exclusive только в ней, что должно решить проблему без заметной потери производительности.

Вторая особенность — разрешение ситуации одновременных записей в кэш-строку, разделяемую разными процессорами в состоянии Shared, известной как конфликт Invalidate-Invalidate. Обычные решения этой проблемы подразумевают передачу данных в ответ на запрос Invalidate даже в случае, когда эти данные уже есть у запросчика, при Shared- и Owned- состояниях строки у запросчика и отвечающего. В системе «Эльбрус-S» применён оригинальный подход, позволяющий этого избежать и сэкономить таким образом до 50% пе-

редач данных на последовательностях чтений и модификаций одной кэш-строки разными процессорами.

В системе «Эльбрус-2S» используется похожий протокол когерентности и вспомогательный фильтр запросов когерентности на основе неполного справочника. Благодаря этому, с одной стороны, состояние Exclusive в системе не нужно, с другой стороны, конфликт Invalidate-Invalidate требует разрешения другим способом. Автором разработан механизм, аналогичный используемому в «Эльбрус-S», но приспособленный к наличию фильтра на основе неполного справочника.

### Литература

1. Advanced Micro Devices, Inc. AMD64 Architecture Programmer's Manual. V. 2. 'System Programming'. — AMD, 2010. — P. 167–169.

УДК 004.318

*И.А. Петров*

ricecob@mail.ru

Московский физико-технический институт  
(государственный университет)  
ЗАО «МЦСТ»

### Разработка кэша справочника для вычислительного комплекса на базе микропроцессора «Эльбрус-2S»

Кластер, построенный на основе 4-ядерного микропроцессора (системы на кристалле, СНК) «Эльбрус-2S», который разрабатывается ЗАО «МЦСТ», состоит из четырех микропроцессоров, соединенных между собой межпроцессорными линками по принципу каждый с каждым. В состав общей распределенной физической памяти кластера входит физическая память каждого микропроцессора, таким образом, кластеры представляют собой систему с неоднородным доступом в память (NUMA).

Одним из главных требований при разработке подобных систем является поддержка когерентности, согласованности обрабатываемых данных, в кэш-памяти микропроцессора. Ранее для поддержки

когерентности в вычислительных комплексах (ВК) на базе одноядерного микропроцессора «Эльбрус-S» использовалась техника полного снуирования — рассылка запросов проверки когерентности всем процессорам системы. Основным недостатком такого механизма является падение эффективной пропускной способности каналов межпроцессорного и межкластерного обмена при увеличении числа процессоров в системе, которое происходит за счёт того, что основную часть информации, передаваемой по этим каналам, составляют пакеты поддержания когерентности (запросы, ответы на них).

В ВК на базе микропроцессора «Эльбрус-2S» для сокращения служебного потока используемый ранее протокол поддержки когерентности расширяется за счёт введения дополнительного элемента — справочника (directory). Справочник — устройство, хранящее информацию о местонахождении и состоянии строк данных оперативной памяти, экспортированных в кэш-памяти процессоров, и формирующее на основе данной информации необходимый минимум запросов поддержки когерентности. При этом в новой разработке реализуется полный справочник, который хранит информацию о каждой строке оперативной памяти системы. Такой объём информации можно хранить только в самой оперативной памяти.

Введение кэш-памяти для справочника обеспечивает большую эффективность работы системы по следующим причинам: 1) снижается задержка доступа к данным справочника, 2) уменьшается нагрузка на каналы памяти. Кэш-память исполняется в виде отдельного модуля, который можно эффективно интегрировать в состав системного коммутатора (SC), одной из функций его является рассылка запросов поддержки когерентности.

Для построения кэш-памяти используется принцип множественно-ассоциативного отображения блоков оперативной памяти на ее блоки. Степень ассоциативности выбрана по минимальному числу ядер в системе (16). Выбор таких параметров, как общий размер кэш-памяти и длина одной кэш-строки, производится по результатам моделирования реальных задач с использованием программной модели кэша справочника. В качестве стратегии замещения кэш-строк берётся комбинация псевдослучайного выбора и алгоритма PseudoLRU, совмещающая в себе простоту реализации и эффективность.

Кэш справочника выполняет следующий набор функций:

1) выдачу данных справочника в системный коммутатор с минимальным отклонением от заданного темпа обработки запросов (1 запрос / такт);

2) формирование и модификацию информации справочника. В процессе разработки был принят формат элемента справочника, обеспечивающий рассылку минимума запросов поддержки когерентности. Размер элемента справочника меняется в зависимости от размера ВК.

В ходе работы была создана синтезируемая rtl-модель кэша справочника, удовлетворяющая всем поставленным требованиям. На данный момент устройство находится на стадии физического проектирования и функционального тестирования.

### Литература

1. *Шерстнёв А.Е., Зайцев А.И.* Организация межпроцессорного обмена в многокластерных системах на базе микропроцессоров «Эльбрус-S» и «МЦСТ-4R» // Вопросы радиоэлектроники. — 2009. — Вып. 3.

УДК 004.252

*М.В. Петровичев*

petroch\_m@mcst.ru

Московский физико-технический институт  
(государственный университет)  
ЗАО «МЦСТ»

### Инициализация регистров конфигурации в многокластерной системе «Эльбрус-S»

В данной системе кластер включает от одного до четырех процессоров, соединяемых между собой по схеме «каждый с каждым» с помощью межпроцессорных линков. Таким же образом формируется многокластерная система, объединяющая нескольких кластеров. В единичном кластере и в многокластерной системе реализован неоднородный доступ к памяти (Non-Uniform Memory Access, NUMA) [1].

Связь кластеров осуществляется в чипе когерентности и коммутации (чип КК), который располагается в кластере на месте пересечения соединений между диагональными процессорами. В него включена системная область общей памяти, содержащая регистры конфигурации кластера; регистры конфигурации каждого процессора содер-

жаются непосредственно в его памяти. В этих регистрах хранятся данные, необходимые для маршрутизации обращений в общую память (соответствие адресных областей общей памяти конкретным процессорам, чипу КК собственного кластера и другим кластерам), а также данные о топологии системы.

При инициализации регистров конфигурации выполняются две процедуры — назначение границ областей памяти и установление топологии системы. Первая процедура должна быть выполнена одним процессором-загрузчиком (Bootstrap Processor, BSP), чтобы не допустить появления неоднозначности в принадлежности областей памяти. Проблема заключается в том, что значения, записываемые в регистры конфигурации, определяют маршрутизацию любых обращений в память, в том числе и в память, выделенную под сами регистры конфигурации. Память, выделенная под регистры конфигурации устройств, определяется их логическими номерами.

Установление топологии заключается в выяснении для каждого линка каждого устройства логического номера того устройства, которое доступно через него. Эта задача не может быть выполнена единственным процессором.

Чтобы инициализация системы была возможна, регистрам конфигурации добавлены следующие дополнительные свойства:

- регистры по сигналу сброса принимают значения, позволяющие обращаться к областям памяти по известным адресам;
- регистры позволяют процессорам получить информацию о линках, через которые они посылают запросы;
- регистры при считывании по некорректным адресам возвращают логический номер устройства-ответчика.

Первый этап алгоритма выполняется процессором-загрузчиком: процессорам и кластерам присваиваются уникальные номера. Одновременно выполняется и конфигурирование линков, через которые производится передача обращений. Второй этап выполняется всеми остальными процессорами — они конфигурируют остальные линки, используя ранее присвоенные номера. Дальнейшая инициализация системы выполняется процессором-загрузчиком (рис. 1).

### Литература

1. Шерстнёв А.Е., Зайцев А.И. Организация межпроцессорного обмена в многокластерных системах на базе микропроцессоров «Эль-

брус-S» и «МЦСТ-4R» // Вопросы радиоэлектроники. Серия ЭВТ. — 2009. — Вып. 3.

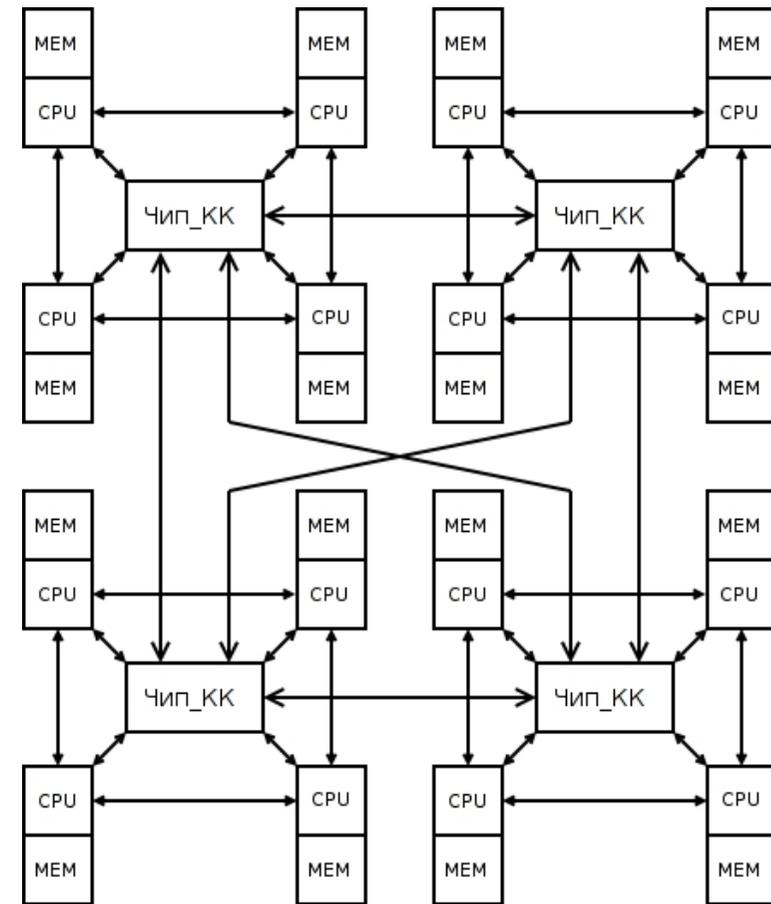


Рис. 1. Система из четырех кластеров, соединенных с помощью чипов КК

УДК 004.272.26

*Д.А. Петрыкин*

denis.petrykin@gmail.com

Московский физико-технический институт  
(государственный университет)  
ЗАО «МЦСТ»

### Коммутатор когерентных запросов и ответов системы на кристалле «Эльбрус-2S»

В процессе разработки системы на кристалле (СНК) «Эльбрус-2S» и кластера на ее основе, проводимой в ЗАО «МЦСТ», значительной проблемой стало обеспечение когерентности данных на аппаратном уровне. Процессорный узел СНК включает в себя четыре ядра, каждое со своей кэш-памятью первого и второго уровней, а также системный коммутатор (как связующий центр), различные контроллеры и прочее оборудование распределённой интерфейсной логики (chipset). В состав кластера входят четыре связанных высокоскоростными каналами процессорных узла, между которыми распределена его общая физическая память (рис. 1).

Поскольку кластер на основе «Эльбрус-2S» является системой с неоднородным доступом в память, а общее количество независимых ядер достаточно велико, то архитектурная установка проекта предполагала, что когерентность данных внутри узла обеспечивается механизмом снупирования (Snooping), а на уровне кластера — механизмом справочника (Directory) [1, 2]. Данная реализация позволяет значительно уменьшить нагрузку на межпроцессорные каналы, обусловленную обменом пакетами поддержки когерентности и, как следствие, увеличить объём полезной информации, передаваемой между процессорами, за счет относительно небольшого справочника [3].

Справочник содержит только общую информацию по процессорным узлам, поэтому каждый из них должен зондировать свои ядра самостоятельно. Была поставлена задача — разработать устройство коммутации когерентных запросов и ответов для процессорного узла. Сложность проблемы заключалась в том, что требовалось обеспечить одновременный прием пакетов как от своего системного контроллера, так и от контроллеров соседних узлов (рис. 2). Это означает, что коммутатор должен выполнять не только функции мультиплексирования

пакетов, но еще и функции их буферизации. Также он должен разослать каждый полученный когерентный запрос всем своим ядрам, потом собрать ответы, обработать их и выдать единый ответ в систему. Более того, для уменьшения латентности памяти была исключена возможность блокировки или задержки когерентных запросов внутри ядер и было зафиксировано время их обработки. Приведенные факторы обусловили необходимость введения дополнительного буфера для хранения ответов данными и отдельного порта для когерентных запросов в кэш-памяти тегов, что в свою очередь внесло некоторую специфику как в работу коммутатора, так и процессорного узла.

С учетом вышеуказанного разработана принципиальная схема устройства и его RTL-описание. Работа коммутатора была проверена и отлажена на вероятностной модели для различных параметров когерентных запросов и ответов.

### Литература

1. Таненбаум Э. Архитектура компьютера. — СПб.: Питер, 2007.
2. Hennessy J.L., Patterson D.A. Computer Architecture. — Kaufmann, 2007.
3. Зайцев А.И., Шерстнёв А.Е. Организация межпроцессорного обмена в многокластерных системах на базе микропроцессоров «Эльбрус-S» и «МЦСТ-4R» // Вопросы радиоэлектроники. — 2009.

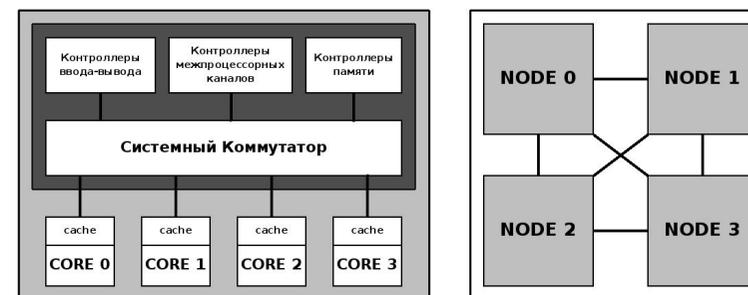


Рис. 1. Схема кластера (слева) и процессорного узла «Эльбрус-2S» (справа)



Рис. 2. Коммутатор когерентных запросов и ответов в составе процессорного узла

УДК 004.4'422

*И.В. Петушков*

piv-tula@mail.ru

Московский физико-технический институт  
(государственный университет)

Институт точной механики и вычислительной техники  
им. С.А. Лебедева РАН

### Исследование методов оптимизации автоматического распараллеливания программ для гетерогенной многоядерной архитектуры CELL / BE

Архитектура CELL В.Е. предназначена для эффективного выполнения параллельных программ, так как каждый процессор состоит из 1 суперскалярного ядра (PPU) и восьми векторных сопроцессоров (SPU).

Исследуем программу EP из пакета NPВ с входными данными класса А. Программа состоит из инициализации, главного цикла и вывода результатов. Профилирование показало, что главный цикл занимает более 99,9 % времени работы программы. Внутри главного цикла последовательно расположены три вложенных цикла — вспомогательный, запись массива X и чтение массива X. Вспомогательный цикл вычисляет параметры для записи массива X на основе только номера итерации. Массив не используется вне цикла, таким образом можно понизить область видимости массива до вложенного внутрь главного цикла. В процессе чтения кроме обращения к массиву данных происходит подсчет статистических данных, однако все статистические данные являются редуцируемыми. Следовательно, можно полностью удалить все зависимости между итерациями главного цикла и распараллелить его.

Так как SPU имеет только 256Кб собственной памяти, а размер массива X равен 1 Мб, то массив придется хранить в оперативной памяти. Самый простой вариант переноса программы на SPU — использование программного кеша.

SPU не имеет модуля предсказания переходов, поэтому для оптимизации EP воспользуемся инлайн-преобразованием, устраняющим явные вызовы функций. Программный кеш подкачивает данные из

оперативной памяти в момент, когда программа запрашивает данные, однако так как EP использует последовательное обращение к элементам массива, то можно использовать двойную буферизацию, которая позволяет отправлять запрос на следующую порцию данных в момент, когда текущая начинает обрабатываться.

Тест EP был запущен на сервере IBM QS21. Неоптимизированный вариант программы с кешем исполнялся 83,30 с, с использованием инлайна и кеша — 11,23 с и с использованием инлайна и двойной буферизации — 5,18 с, то есть применение описанных оптимизаций даёт более чем 16-тикратный прирост производительности.

### Литература

1. *Ахо А.В., Лам М.С., Сети Р., Ульман Д.Д.* Компиляторы: принципы, технологии и инструментарий. — 2 издание. — М.: ИД «Вильямс», 2008. — 1184 с.
2. *Abraham Arevalo [et al.]*. Programming the Cell Broadband Engine™ Architecture. Huntington Beach: Vervante. — 2008.
3. Synergistic Processor Unit Instruction Set Architecture v 1.2/ed. by IBM — Hopewell Junction, 2007.

УДК 004.318

*А.С. Рогов*

Andrei.Rogov@gmail.com

Московский физико-технический институт  
(государственный университет)  
ЗАО «МЦСТ»

### Адаптация буферизирующего коммутатора данных системы на кристалле

В настоящее время в ЗАО «МЦСТ» совместно с ГУП НПЦ «ЭЛВИС» ведется разработка системы на кристалле (СНК) для применения в комплексах обработки радиолокационной информации в режиме жесткого реального времени. Для ускорения проектирования при создании новой СНК использовались наработки из предыдущего проекта, что потребовало адаптации наследованных устройств в

составе новой системы. В данной работе рассматривается адаптация буферизирующего коммутатора данных.

СНК условно можно разделить на две части: четырёхъядерный сигнальный процессор (DSP-кластер) компании «ЭЛВИС» и универсальную процессорную часть (УЧ) разработки ЗАО «МЦСТ». УЧ состоит из двух универсальных ядер архитектуры «Эльбрус» [1] и контроллера системного обмена (SIC), в состав которого входят буферизирующий коммутатор данных (DataBox) и его абоненты (рис. 1):

- 1) IOCOM — коммутатор устройств ввода-вывода;
- 2) MC — контроллер памяти;
- 3) SC — системный коммутатор;
- 4) SIC — контроллер согласования процессорных ядер; MAU — устройство доступа к памяти.

Чтобы обеспечить работу коммутатора DataBox в составе системы на кристалле, необходимо было решить следующие задачи.

1. Согласовать пропускные способности коммутатора и его абонентов.
2. Минимизировать задержки передачи данных.
3. Обеспечить работу коммутатора на номинальной частоте 500 МГц.

В результате анализа коммутатора и его абонентов на предмет соответствия этим требованиям приняты следующие решения.

1. Изменить протокол обмена DataBox-MAU с целью расширения шины передачи данных в MAU с 16 бит до 64 бит и устранения задержки передачи данных в 2 такта.
2. Изменить протокол обмена DataBox-SC с целью расширения шины передачи данных в SC с 32 бит до 64 бит.
3. Увеличить размер буфера DMA (Direct Memory Access)-записи в 4 раза с целью устранения частых блокировок буфера.
4. Устранить критические пути, обнаруженные средствами САПР синтеза Design Compiler фирмы Synopsys.

В процессе работы выполнены необходимые доработки Verilog-описания коммутатора DataBox, позволившие решить все поставленные задачи. При этом были исправлены обнаруженные ошибки и произведено тестирование в составе RTL-модели СНК. В настоящее время производится тестирование прототипа на ПЛИС.

### Литература

1. Волконский В., Ким А., Назаров Л., Перекаатов В., Фельдман В. Микропроцессоры и вычислительные комплексы российской компании МЦСТ // Электроника. — 2008. — № 8. — С. 65–69.

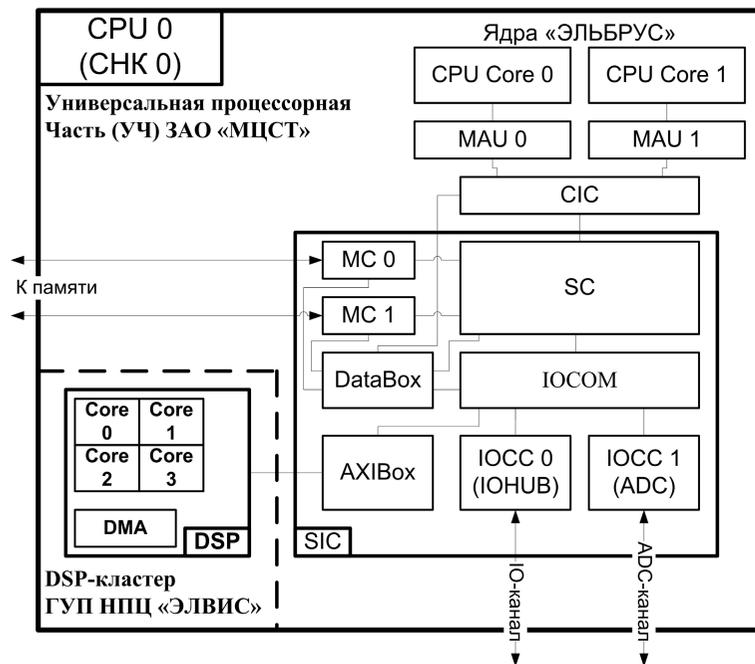


Рис. 1. Структурная схема СНК

УДК 004.052.42

М.П. Рыжов

ryzhov@mcst.ru

ЗАО «МЦСТ»

Институт электронных управляющих машин

### Система верификации модулей микропроцессора, управляемая тестовым покрытием

Согласно статистике, 70% цикла разработки микропроцессора занимает верификация [1]. Для верификации достаточно большой системы используются методики написания и генерации тестов, которые не охватывают все возможные ситуации системы и, следовательно, не дают гарантий обнаружения всех ошибок в дизайне. Чтобы обеспечить нужное качество верификации и определить степень готовности дизайна к выпуску, требуется оценка доли ситуаций, которые были покрыты тестами — метрики покрытия. Для наиболее распространенных метрик нет строгих доказательств корреляции между числом найденных ошибок и отличием величины покрытия от единицы. Данное предположение остается эмпирическим, несмотря на широкое применение метрик покрытия для оценки качества верификации [2].

При традиционном подходе к генерации тестов покрытие учитывается после генерации и исполнения тестов. Методика управляемой тестовым покрытием генерации тестовых воздействий предлагает использовать величину покрытия в процессе генерации тестов для обеспечения обратной связи [3]. В работе исследуется возможность применения данного подхода к верификации изолированных устройств, описанных на языке verilog.

Управляемая покрытием верификация предъявляет дополнительные требования к моделирующей системе. Требуется возможность измерять покрытие, сохранять и восстанавливать состояние модели во время моделирования с высокой, вплоть до потактовой, частотой. Для удовлетворения данным требованиям используется verilator — транслятор RTL-кода в модель на языке C++. Использование метрик исходных тестов синтезированного и оттранслированного модуля также позволяет использовать независимую метрику покрытия, более адекватно отражающую логику устройства, путем анализа по-

крытия кода на языке C++. Благодаря размещению генератора тестовых стимулов, модели и кода, измеряющего покрытие, в едином исполняемом файле обеспечена возможность проводить операции по работе с состоянием модели и измерению покрытия с потактовой частотой.

Применение обратной связи по покрытию позволило более быстро достигать заданной величины покрытия по сравнению с псевдослучайным генератором, а также автоматизировать подбор его параметров генерации.

### Литература

1. *Lam W.K.* Hardware Design Verification: Simulation and Formal Method-Based Approaches. — Prentice Hall, 2005. — 624 p.
2. *Tasiran S., Keutzer K.* Coverage Metrics for Functional Validation of Hardware Designs // IEEE Design & Test archive. — 2001. — V. 18, I. 4. — P. 36–45.
3. *Mas G., Smeets R., Benjamin M., Geist D., Hartman A., Wolfsthal Y.* A Study in Coverage-Driven Test Generation // Proceedings of the 36th annual ACM / IEEE Design Automation Conference. — 1999. — P. 970–975.

---

УДК 004.324

*Д.Г. Сметов*

dsmv@insys.ru

ЗАО «Инструментальные системы»  
Концерн радиостроения «Вега»

### Контроллер DMA для шины PCI Express

В настоящее время шина PCI Express является основной шиной для взаимодействия персонального компьютера с внешними устройствами. Реализация контроллера возможна на современных ПЛИС таких как Virtex-4, Virtex-5, Virtex-6. Для реализации было выбрано ядро EXDMA от фирмы PLD Application [1]. В процессе работы выявлены три главные проблемы: низкая скорость работы с фрагментированной памятью, низкая скорость вывода данных в режиме FIFO, возможность потери данных при ошибке Completion Timeout.

Для достижения максимальной скорости обмена используется режим SCATTER-GATHER. В этом режиме выделяется память для специальных дескрипторов, которые указывают на расположение буферов обмена. Контроллер DMA считывает дескриптор, определяет по ним расположение блока памяти и производит передачу данных. Далее он может перейти к следующему дескриптору. Обмен происходит без участия центрального процессора. Проблема заключается в выделении памяти. В системной области можно выделить непрерывный блок памяти, но только небольшого объема — до 128 Мбайт. В пользовательской области можно выделить большой объем — до 1,5 Гбайт, но эта память будет разбита на страницы по 4 килобайта.

Традиционное решение контроллера, когда один дескриптор описывает один блок памяти, при работе с фрагментированной памятью показывает большое снижение скорости обмена. Для шины PCI Express x4 скорость ввода в непрерывную память составляет 710 Мбайт/с, а при использовании фрагментированной памяти — только 550 Мбайт/с.

Процесс считывания данных на шине PCI Express состоит из посылки запроса и получения пакета с запрашиваемыми данными. Задержка между посылкой запроса и ответным пакетом не зависит от размера пакета и составляет примерно 1 мкс. Время передачи 4 кбайт на скорости 700 Мбайт/с составляет примерно 5 мкс, что уже сравнимо со временем считывания дескриптора.

Автором разработан контроллер, в котором дескрипторы объединены в специальный блок дескрипторов. Блок дескрипторов содержит указатели на 63 блока памяти и на следующий блок дескрипторов. Данное решение позволило резко увеличить скорость работы с фрагментированной памятью. Для непрерывной памяти — 714 Мбайт/с. Для фрагментированной — 709 Мбайт/с. Эти результаты получены на модуле АМВРЕХ8 [2] при использовании шины PCI Express x4. Контроллер также решает проблемы низкой скорости при выводе в режиме FIFO и потери данных из-за ошибки Completion Timeout.

Использование ПЛИС Virtex-5 позволило реализовать контроллер PCI Express x8. Данное решение применяется на модулях ADP201x1 [3], АМВРЕХ5 [4]. Для шины PCI Express x8 достигнута скорость ввода данных 1490 Мбайт/с и скорость вывода 1016 Мбайт/с.

### Литература

1. EZDMA 2IP for Xilinx Hard IP Reference Manual. — PLDA. — URL: [http://www.plda.com/download/doc/ip/ezdma2\\_xilinx/ezdma2\\_reference\\_manual.pdf](http://www.plda.com/download/doc/ip/ezdma2_xilinx/ezdma2_reference_manual.pdf).
2. Базовый модуль AMBPEX8. — URL: <http://www.insys.ru/ambunits/ambpex8>.
3. Базовый модуль ADP201x1. — URL: <http://www.insys.ru/dsp/adp201x1>.
4. Базовый модуль AMBPEX5. — URL: <http://www.insys.ru/ambunits/ambpex5>.

УДК 004.052.42

*Л.С. Тимин*

Leonid.S.Timin@mcst.ru

ЗАО «МЦСТ»

Институт электронных управляющих машин  
Московский физико-технический институт  
(государственный университет)

### Моделирование неисправной работы встроенной памяти микропроцессора

Блоки встроенной памяти являются неотъемлемой частью современных микропроцессоров; они занимают около половины площади кристалла, и для их формирования используется порядка двух третей всех транзисторов на чипе. Поэтому использование исправной встроенной памяти является обязательным условием корректности работы всего микропроцессора.

В то же время встроенная память чрезвычайно подвержена неисправностям, различным по своему происхождению и проявлению. Их возникновению способствуют и большая площадь, и жесткие режимы работы транзисторов, и большое их число. Это привело к созданию различных механизмов диагностики и компенсации неисправностей. При переходе от одного поколения технологических процессов производства микросхем к другому обретают статистическую значимость

все новые типы неисправностей, что вынуждает развивать методы их обнаружения и средства моделирования неисправностей.

В докладе предлагается подход к поведенческому моделированию неисправных блоков встроенной памяти, основанный на применении транслируемого языка высокого уровня для описания функциональной модели неисправности. Сначала приводится описание программной модели обобщенной исправной памяти. Затем рассматривается построение функциональных моделей неисправностей. В итоге модель неисправной памяти строится путем внедрения модели неисправности в работу модели исправной памяти. Реализация приведенного подхода может работать автономно или в рамках симуляции описания устройства на языке описания аппаратуры.

Этот подход был применен к моделированию неисправностей декодера адреса блока встроенной памяти. Рассмотрены различные типы неисправностей и проверена способность конкретного алгоритма тестирования блоков встроенной памяти выявлять их.

В результате показано, что предложенный подход к поведенческому моделированию неисправных блоков встроенной памяти микропроцессора охватывает широкий спектр неисправностей и может применяться при разработке и отладке механизмов диагностики и компенсации неисправностей блоков встроенной памяти.

### Литература

1. Hamdioui S., Van De Goer A.J. Address decoder faults and their tests for two-port memories // Proceedings. International Workshop on Memory Technology, Design and Testing — 1998. — P. 97–103.
2. Borri S., Hage-Hassan M., Girard P., Pravossoudovitch S., Virazel A. Defect-oriented dynamic fault models for embedded-SRAMs // Proceedings Eighth IEEE European Test Workshop. — 2003. — P. 23–28.

*А.В. Фёдоров*

alexvf@bk.ru

Московский физико-технический институт  
(государственный университет)  
ЗАО «МЦСТ»

## Разработка библиотеки нитей POSIX реального времени

POSIX — это набор стандартов, разработанный институтом IEEE и принятый ISO/ IEC в 1988 году. Он быстро расширялся: в 1990 году шла работа уже над 10 проектами. В 1993 году был принят стандарт IEEE 1003.1c-1993 (POSIX threads), включающий в себя интерфейс для работы с многопоточными приложениями. Его преимуществом для систем реального времени является низкоуровневость, позволяющая программисту добиваться лучшей производительности. С момента его появления прошло почти двадцать лет, и многие приложения либо уже соответствуют стандарту, либо были переписаны с использованием стандартных системных интерфейсов.

В популярнейшей операционной системе Linux нити POSIX реализованы полностью, и уже многие годы идёт работа по их переработке с учётом требований систем реального времени. Единственная современная библиотека нитей POSIX для Linux — NPTL — также постепенно подвергалась изменениям, хотя они тормозились обычными пользователями, для которых поддержка режима реального времени приводила только к замедлению их систем.

Из-за таких трений между обычными пользователями Linux и теми, для которых важна предсказуемость работы системы, а также из-за желания сообщества разработчиков сделать универсальный и масштабируемый продукт, который удовлетворит самым разнообразным требованиям, работа по реализации нитей POSIX для систем реального времени продвигается медленно, и в настоящее время ещё остаются места, которые желательны оптимизировать.

Автор в своем докладе приводит требования систем реального времени и, исходя из них, указывает, на каких принципах должна основываться библиотека нитей POSIX реального времени, после чего

делается небольшой обзор NPTL с учётом соответствия изложенным принципам.

В частности, недостатком NPTL является длинная иерархия объектов синхронизации: барьеры и условные переменные реализуются на основе пользовательских блокировок, пользовательские блокировки — на основе futex'ов, furtex'ы — на основе ядерных блокировок, а те, в свою очередь, — на основе ядерных спинлоков. Устранение этой иерархии приводит к необходимости более тесной интеграции библиотеки с ядром операционной системы, а эта интеграция делает нежелательным использование кода ядерных блокировок для реализации пользовательских блокировок, в том числе потому, что в ядерных блокировках не поддерживаются протокол защиты приоритета и атрибут устойчивости блокировок.

### Литература

1. Архив Linux kernel mailing list.
2. Архив libc-alpha mailing list.

*Х.В. Чан<sup>1</sup>, Н.Б. Преображенский<sup>2</sup>*

trankhanh.miptvn@gmail.com, nbpreobrazhenskijj@ipmce.ru

<sup>1</sup> Московский физико-технический институт  
(государственный университет)

<sup>2</sup> Институт точной механики и вычислительной техники  
им. С.А. Лебедева РАН

## Аппаратная реализация десятичной арифметики с плавающей запятой

Аппаратная реализация десятичной арифметики с плавающей запятой — актуальная задача современной вычислительной техники, об этом свидетельствует тот факт, что на последней конференции по компьютерной арифметике 11 докладов из 34 были посвящены этой проблеме.

Несмотря на то, что к 60-м годам прошлого века большинство вычислительных машин использовали двоичную систему из-за ее экономичности, простоты, большей скорости и оптимальности в научно-

технических вычислениях, в последние 10 лет возник интерес к использованию десятичной системы в вычислительной технике. Это обусловлено как развитием технологии, которая позволяет изготавливать микропроцессоры, содержащие более 2 миллиардов транзисторов, и тем самым использовать более затратные с точки зрения аппаратуры алгоритмы, так и недостатками, присущими двоичной системе. К ним относится необходимость преобразования входных данных, обычно представляемых в десятичном виде, в двоичный вид и обратный перевод результатов в привычный для человека десятичный вид. Особенно это сказывается на вычислениях, связанных с финансами, налогами, коммерцией. Такие вычисления обычно характеризуются большим объемом входных данных и малой глубиной вычислений. Кроме того, финансовые вычисления выполняются по правилам, отличным от правил научных вычислений. Результат, полученный компьютером, должен соответствовать результату, который можно вычислить вручную.

Поддержка десятичной арифметики осуществляется как в языках программирования, таких как COBOL, Basic, Rexx, Java, C#, так и в библиотеках. Исследования показывают, что этого недостаточно, так как некоторые прикладные программы от 50% до 90% времени тратят на десятичные вычисления, что свидетельствует в пользу аппаратной реализации десятичной арифметики, которая позволяет ускорить выполнение операций десятичной арифметики в  $10^2$ – $10^3$  раз по сравнению с программной реализацией.

Целочисленная десятичная арифметика не обеспечивает необходимую точность и диапазон. Например, ряд последовательных умножений при вычислении сложных процентов приводит к резкому увеличению количества разрядов, необходимых для представления точного произведения, тем самым требуется округление и использование десятичной арифметики с плавающей запятой.

Сначала в некоторых микропроцессорах (Motorola 68x, IBM PowerPC, HP PA-RISC) появилась небольшая аппаратная поддержка десятичной арифметики, а в 2007 году в микропроцессорах IBM Power6 и z9 появилось DFU (десятичное устройство с плавающей запятой). В советском суперкомпьютере «Эльбрус-2» еще в 70-е годы было устройство двоично-десятичных преобразований.

В 2008 году была принята пересмотренная версия стандарта на двоичную арифметику с плавающей запятой, в новой редакции этого документа IEEE Std 754-2008, кроме двоичных чисел с плавающей запятой, рассматриваются десятичные числа с плавающей запятой.

Требования стандарта могут выполняться в аппаратуре программным способом или любой их комбинацией. Принятие этого стандарта дает новый импульс к созданию аппаратуры, реализующей десятичную арифметику с плавающей запятой.

Стандарт определяет 3 десятичных формата: 32, 64 и 128 разрядов. Все эти форматы можно использовать для обмена информацией, а для вычислений используются в основном форматы 64 и 128. Десятичное число представляется в виде

$$(-1)^S \cdot 10^{(E-bias)} \cdot C,$$

где  $S$  — знак числа,  $E$  — смещенный порядок,  $bias$  — смещение,  $C$  — мантисса. Существует два метода кодирования мантиссы: двоичное (Binary Integer Decimal) и десятичное (Densely Packed Decimal). В первом случае вся мантисса рассматривается как двоичное число, во втором — каждые 10 двоичных разрядов соответствуют трем десятичным цифрам.

Используя этот стандарт, мы разработали устройство сложения десятичных чисел с плавающей запятой. На рис. 1 показана структура данного устройства. Оно состоит из некоторых узлов.

Из регистра операндов после распаковки и преобразования получаются знак, порядок в двоичном коде и мантисса каждого операнда в BCD-коде. После этого по разности порядков выполняется перестановка мантисс. Для улучшения точности вычисления находится число нулей для каждой мантиссы.

С помощью их и разности порядков Alignment-узел вычисляет код сдвига. Здесь мантисса с большим порядком сдвигается вправо, а с меньшим — влево. Собственное сложение и вычитание реализуются в узле BCD Adder. В нем мантиссы складываются или вычитаются как в двоичном сумматоре с особенностью вычитания переноса и добавления корректирования суммы. Окончательный результат получается после округления.

Устройство синтезировано на стандартной библиотеке технологии 90 нм. Оно занимает площадь 5800 gates. Время выполнения операции 3,7 нс. Сравнение с двоичным устройством сложения площадь увеличивается на 40%, а время — на 20%.

## Литература

1. Buchholz W. Fingers or Fists? (The Choice of Decimal or Binary Representation) // Communications of the ACM. — 1959. — V. 2, N. 12. — P. 3–11.

2. *Cowlshaw M.* Decimal Floating-Point: Algorithm for Computers // Proc. 16th IEEE Symposium on Computer Arithmetic. — 2003. — V. 1. — P. 104–111.

3. *Mohamodi M., Eshghi M., Haghparast M., Bahrololoom A.* Design and Optimization of Reversible BCD Adder / Subtractor Circuit for Quantum and Nanotechnology Based Systems // World Applied Sciences Journal. — 2008. — V. 4. — P. 787–792.

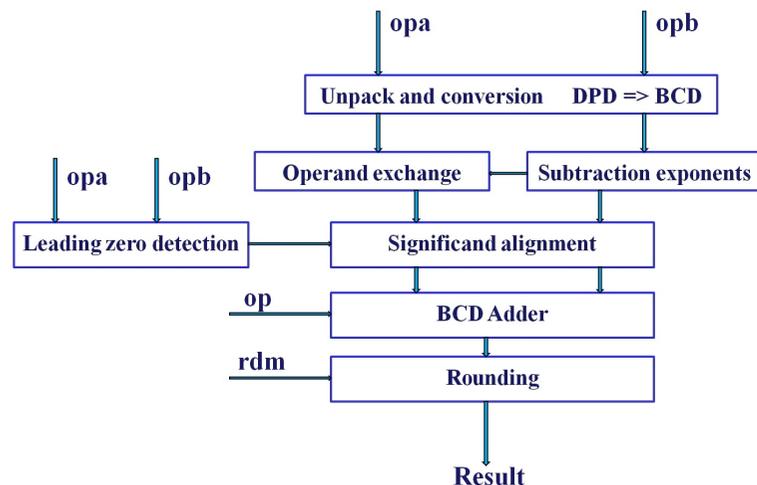


Рис. 1. Блок-схема устройства сложения десятичных чисел с плавающей запятой

УДК 004.032

*А.Е. Шерстнёв*

andrewsh84@gmail.com

Институт электронных управляющих машин  
ЗАО «МЦСТ»

### Аппаратное определение трассы доступа в оперативную память на ВК «Эльбрус-3М1»

Определение последовательности обращений процессора в оперативную память (трассы доступа в память) позволяет распараллелить выполнение задачи, а также является важной составляющей разработки алгоритма оптимизации компилятора [1]. Наиболее простой способ определения трассы доступа в память — анализ кода задачи, представленного описанием на языке высокого уровня или в ассемблерном виде [2]. Но такой метод не позволяет решить поставленную задачу с достаточной точностью в силу следующих причин:

- Теоретическому анализу поддаётся код конкретного приложения, но не система в целом, в которой помимо пользовательского приложения также выполняется код служебных процессов операционной системы и обработчиков прерываний.
- Логическая последовательность чтений и записей не соответствует реальной нагрузке на оперативную память, так как обращения в память происходят посредством контроллера кэша.
- В оперативную память также обращаются вспомогательные блоки процессора, например, отвечающие за подкачку кода.

В итоге теоретически определённая трасса обращений в память не в полной мере соответствует действительности, поскольку рассчитывается на относительно высоком уровне функционирования системы. Данная работа направлена на то, чтобы наиболее достоверно определить трассу для любого исполняемого приложения. Предлагаемый метод основывается на встраивании в чипсет («северный мост») системы дополнительного мониторингового оборудования, сохраняющего историю исполнения запросов в контроллере памяти для последующего анализа. Интеграция мониторингового оборудования в чипсет была

проведена на ВК «Эльбрус-3М1» [3]. «Эльбрус-3М1» — это 2-процессорная система (рис. 1), процессоры которой взаимодействуют посредством чипсета, реализованного на ПЛИС (программируемые логические интегральные схемы). ПЛИС позволяют вносить изменения во внутреннюю логику работы схемы в течение всего цикла её использования. Встраиваемое мониторинговое оборудование представляет собой блоки памяти, размещаемые перед входным портом контроллера памяти, в которые записываются команды, передаваемые в контроллер. В строке памяти монитора сохраняется физический адрес запроса и тип команды (чтение / запись). Размер памяти может быть сконфигурирован в момент компиляции внутренней структуры чипсета (прошивки). Устанавливаемый на данный момент тип ПЛИС (Altera EP2S130F1508C3) [4] позволяет сохранять трассы размером ~ 200 000 элементов, что по времени соответствует 7 мс. При необходимости трасса может быть фрагментирована для сохранения результатов работы приложения в разные моменты времени или анализа нескольких задач за один прогон. Управление запуском мониторов осуществляется в автоматическом режиме по событию, определяемому на момент компиляции прошивки чипсета, или при помощи интерфейса JTAG [5].

Рассмотренный способ не имеет приведённых выше недостатков в силу того, что отслеживаются все запросы именно в той последовательности, в которой они обрабатываются контроллером памяти, и позволяет точно определить режим доступа в память в произвольный отрезок времени.

### Литература

1. Colwell R.P., Nix R.P., O'Donnell J.J., Papworth D.B., Rodman P.K. A VLIW architecture for a trace scheduling compiler // IEEE Transaction on Computers. — 1988. — V. 37.
2. Zhang Y., Haga S., Barua R. Execution history guided instruction prefetching // Proceedings of the 2002 International Conference on Supercomputing. — NY, USA: ACM, New York City, 2002.
3. Грабежной А.В., Калякин А.А., Нейман-заде И.И., Ступаченко Е.В., Тарасенко Л.Г. Оценка быстродействия процессора ЕЗМ // Высокопроизводительные вычислительные системы и микропроцессоры: сборник трудов ИМВС РАН. — 2006. — Вып. 9.
4. Stratix II Device Handbook. — URL: [http://www.altera.com/literature/hb/stx2/stratix2\\_handbook.pdf](http://www.altera.com/literature/hb/stx2/stratix2_handbook.pdf)

5. Quartus II Version 6.0 Handbook — URL: [http://www.altera.com/literature/hb/qts/quartusii\\_handbook.pdf](http://www.altera.com/literature/hb/qts/quartusii_handbook.pdf)

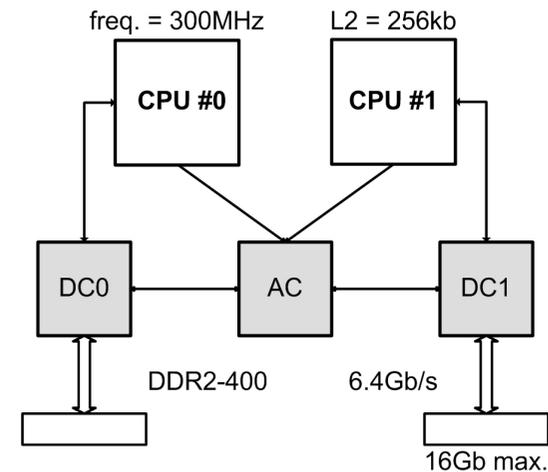


Рис. 1. Схема «Эльбрус-3М1». AC — коммутатор адреса, DC — коммутатор данных

## Секция интеллектуальных информационных систем и технологий

---

УДК 004.942

*А.С. Акопов, Л.А. Бекларян*

akopovas@stream.ru, beklar@cemi.rssi.ru

Центральный экономико-математический институт РАН

### Организация вычислительных процедур для сложных управляемых систем

Современные требования к системам управления сложными динамическими объектами, характеризующимися сверхвысокой размерностью и наличием сложных нелинейных зависимостей между характеристиками звеньев системы и их компонент, обуславливают необходимость разработки эффективных вычислительных процедур, класса генетических алгоритмов, нейронных сетей и др.

Динамика таких систем описывается функционально-дифференциальными уравнениями. При этом при реализации подобных систем возникают проблемы, связанные со сверхбольшой размерностью решаемых задач, неопределенностью в выборе эффективных управляющих воздействий и др. В этих условиях одним из наиболее эффективных способов решения систем функционально-дифференциальных уравнений и задач глобальной многокритериальной условной оптимизации (в большинстве случаев относящихся к классу NP-трудных задач) является применение эволюционного программирования, в частности, модифицированных генетических алгоритмов.

В работах [1]–[3] изучены вопросы проектирования систем управления сложными организационными структурами, предложен новый генетический алгоритм, обеспечивающий, в частности, возможность решения задачи максимизации акционерной стоимости вертикально-интегрированной нефтяной компании при различных ограничениях.

Генетический алгоритм используется для разработки эффективной процедуры формирования субоптимальных инвестиционных решений. Центральным элементом такой процедуры является оценивание популяции ГА, использующее степень стабилизации фитнес-функции для популяции в качестве критерия сходимости.

Таким образом, разработан программный комплекс и вычислительная процедура, обеспечивающая возможность решения задач глобальной условной оптимизации сверхбольшой размерности для нелинейной динамической системы. Особенностью данной процедуры является использование средств имитационного моделирования для расчета характеристик звеньев сложной вертикально-интегрированной системы. При этом разработанные имитационные модели звеньев системы интегрированы с модифицированным генетическим оптимизационным алгоритмом (ГА).

Особенностью данного алгоритма является применение правил угасающей селекции, реализуемых посредством вычисления вероятности селекции родительских особей (ГА) обратно пропорционально количеству нерентабельных генов в портфеле проектов. В результате существенно уменьшается время на поиск субоптимальных решений ГА. Кроме того, для повышения эффективности работы ГА предлагается распараллеливание вычислений на основе так называемой «островной модели», суть которой заключается в равномерном разбиении популяции особей на равные доли между имеющимися процессорами с целью самостоятельного развития подпопуляций и периодического (например, через каждые 5–6 поколений) обмена между процессорами несколькими наиболее приспособленными особями. При этом подбирается частота обмена особями между подпопуляциями (частота миграции) с целью предотвращения преждевременной сходимости.

В заключение отметим, что разработанный подход может быть использован при проектировании эффективных вычислительных процедур для сложных управляемых динамических систем.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (грант No. 09-01-00324-а) и грантом поддержки научных школ (НШ-3038.2008.1).

### Литература

1. *Акопов А.С.* К вопросу проектирования интеллектуальных систем управления сложными организационными структурами (I). Математическое обеспечение системы управления инвестиционной де-

тельность вертикально интегрированной нефтяной компании // Проблемы управления. — 2010. — № 6.

2. Аюпов А.С., Бекларян Г.Л. Интеллектуальные гибридные системы управления деятельностью вертикально-интегрированными организационными структурами: препринт WP/2009/267. — М.: ЦЭМИ РАН, 2009. — 54 с.

3. Аюпов А.С., Бекларян Л.А. Анализ эффективности государственной регулирующей политики по отношению к субъектам ТЭК с помощью динамического имитационного моделирования: препринт WP/2004/174. — М.: ЦЭМИ РАН, 2004. — 47 с.

УДК 004.93'12

*А.А. Домунян, М.Н. Сергейчук*

*inventor@pisem.net, sergiuchuckmisha@gmail.com*

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН

## Кортексный сканер

**Введение.** Машинное зрение находит применение во многих областях техники. Системы машинного зрения выполняют ввод изображений, их предобработку и распознавание. Если ввод изображений включает стандартизированные процедуры, то алгоритмы предобработки специфичны и зависят от решаемых задач, поскольку для различных задач, как правило, требуются те или иные специфические признаки, которые отыскиваются на изображениях на этапе предобработки. В данной статье рассматривается возможность создания относительно универсальных программно-аппаратных средств для этапа предобработки изображений, что позволит в некоторой степени стандартизировать признаки и процедуры их выделения. Такая универсализация может быть достигнута в результате механизмов работы первичной зрительной области V1 коры головного мозга.

Из работы [2] известно, что колонки в области V1 реагируют на линии, расположенные под определённым наклоном. Например, одна колонка будет активироваться, когда через неё проходит линия под углом  $15^\circ$ , а другая — когда через неё проходит линия под углом  $20^\circ$ .

На рис. 1 колонки, представленные секторами, активируются, когда изображение линии проецируется на соответствующий сектор.

**Подход к цифровой реализации функций первичной зрительной области.** Цифровым аналогом выходных данных этой области могут служить числа  $x$ ,  $y$  и  $\alpha$ , где  $x$  и  $y$  — пространственные координаты колонки, а  $\alpha$  — угол, под которым проходит линия. В данной статье рассматривается задача создания устройства, называемого кортексным сканером, выходом которого служат (наряду с традиционными координатами  $x$ ,  $y$  пикселей изображения) доминирующие градиенты  $\alpha$  пикселей.

Если в области V1 колонки, связанные с пикселями сетчатки, реагируют параллельно на интересующие их градиенты, то в кортексном сканере некоторое маленькое окно размером  $M \times M$  пикселей, например,  $M = 32$ , последовательно сканирует все пиксели изображения. Над окном находятся  $32 \times 32$  колонки памяти. Ячейки каждой колонки содержат имена градиентов, которые активизируются в зависимости от наклона линии (градиента изображения) в точке, соответствующей центру окна. Максимально активное, то есть наиболее часто встречающееся, имя представляет собой величину градиента изображения в центральной точке. Если центр окна находится в равномерно освещённой области, то все имена градиентов будут активированы в равной степени, то есть победителя нет и, значит, в данной точке градиент отсутствует. Если центр окна находится на границе, где имеет место перепад яркости, то появляется доминирующий градиент (рис. 2).

**Схемотехника.** На рис. 3 изображена блок-схема предполагаемого портативного устройства, занимающегося предобработкой изображения, для последующего распознавания.

Здесь камера — это законченный модуль, состоящий из оптической линзы, матрицы ПЗС и внутреннего контроллера с последовательным интерфейсом ввода-вывода. КМОП-камера выглядит так, как на рис. 4.

## Литература

1. Максфилд К. Проектирование на ПЛИС. Архитектура, средства и методы. / пер. с англ. — М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2007. — 408 с.
2. Хьюбел Д. Глаз, мозг, зрение. — М.: Мир, 1990. — 240 с.
3. Mikhailov A. Digital neural cortex // Proceedings of the Artificial Neural Networks in Engineering Conference. — St. Louis, Missouri, USA: 2007.

4. Felleman D.J., Van Essen D.C. Distributed hierarchical processing in primate cerebral cortex // Cerebral Cortex. — 1991.

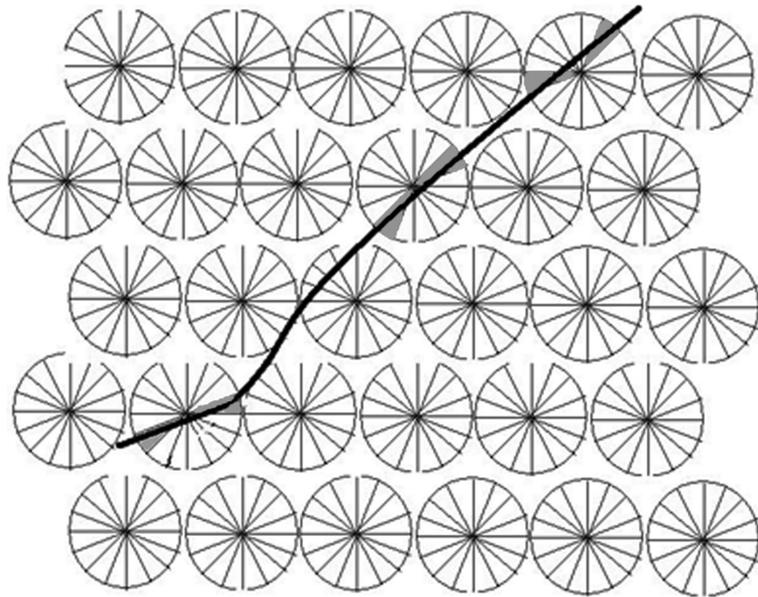


Рис. 1. Активация колонок первичной зрительной области в зависимости от углов проецируемых линий

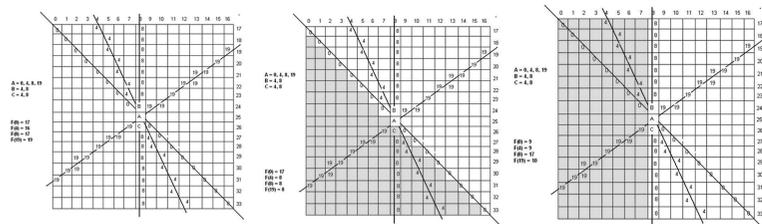


Рис. 2. (а): Случай равномерного освещения поля окна, (б): Тень покрывает левый нижний угол поля окна, (в): Тень покрывает левое поле окна

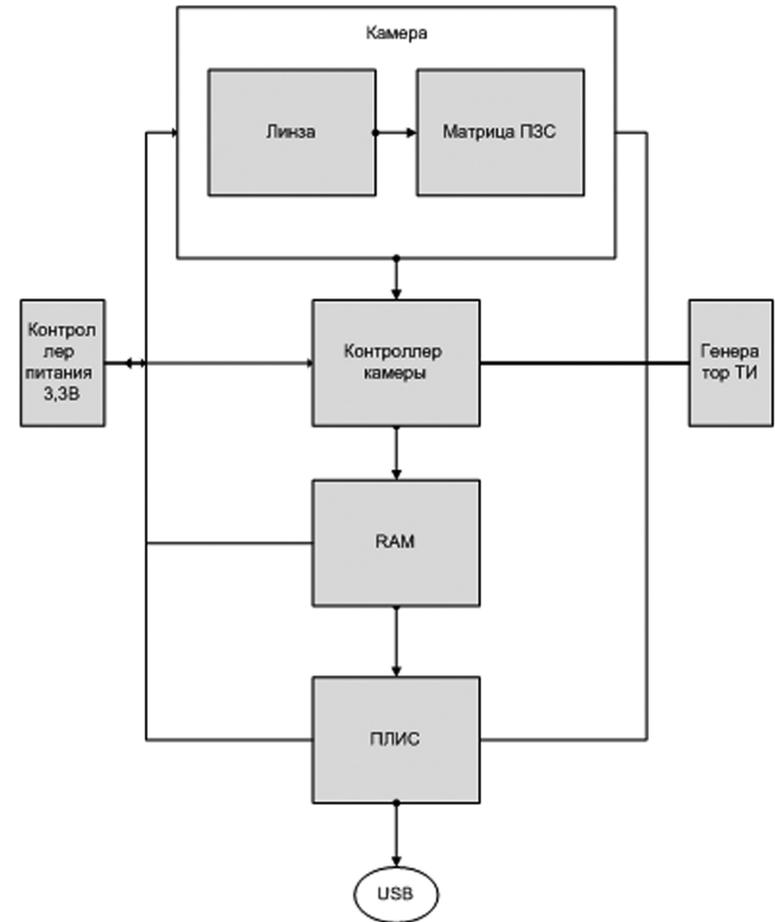


Рис. 3. Блок-схема кортексного сканера



Рис. 4. Внешний вид камеры

УДК 004.4'4

*Д.А. Завражнов*

zavdimka@gmail.com

Московский физико-технический институт  
(государственный университет)**Использование виртуальной машины в среде Linux**

**Актуальность.** В настоящее время актуальной задачей является организация рабочих мест на одном компьютере для обучения специалистов разных уровней и специализаций. Это позволяют сделать программы эмуляции виртуального оборудования, на базе которых запускаются операционные системы. При этом возникают некоторые ограничения и тонкости:

- защиты информации и ограничения возможностей программ,
- исследования производительности программного обеспечения или новой компьютерной архитектуры,

- эмуляции различных архитектур (например, эмулятор игровой приставки),
- моделирования информационных систем с клиент-серверной архитектурой на одной ЭВМ (эмуляция компьютерной сети с помощью нескольких виртуальных машин),
- упрощения управления кластерами — виртуальные машины могут просто мигрировать с одной физической машины на другую во время работы.

**Цель исследования.** Создание комплекса программ, позволяющего оптимизировать работу нескольких пользователей с одним компьютером.

**Задачи исследования.**

- Осуществить полную эмуляцию виртуального оборудования.
- Реализовать полное разделение между пользователями
- Сделать поддержку съемных носителей (USB flash).
- Настроить поддержку локальной сети.
- Осуществить полную или частичную неизменность образа жесткого диска виртуальной машины.

Нами была исследована программа VirtualBox фирмы Oracle. К достоинствам этой программы можно отнести: открытость исходного кода, кроссплатформенность, модульность и множество других преимуществ. Были рассмотрены способы получения полной эмуляции на примере запуска Windows XP в виртуальной машине, в то время как на хосте установлен Linux. Данное исследование позволило полностью отказаться от установки Windows на компьютере, а в тех ситуациях, когда он необходим, воспользоваться виртуальной машиной. При правильной настройке данной виртуальной машины отличий от реального компьютера не наблюдается: поддерживаются USB устройства, аппаратное ускорение 3D. Кроме того найдены преимущества, позволяющие свести к минимуму вероятность заражения вирусами.

Также была исследована надежность данной связки в образовательных целях. Она показала высокую устойчивость в условиях массовой и постоянной эксплуатации, гибкость настройки под конкретные задачи, быстроту развертывания. Модульность разработанной сборки позволяет легко обнаруживать и устранять неполадки.

### Литература

1. *Подлесных Д.А.* Сравнение технологий виртуализации операционных систем // Труды XLVIII конференция МФТИ. — М.: МФТИ, 2005. — Т. 7. — С. 51.

УДК 519.688

*С.Н. Загоруйко*<sup>1</sup>, *Д.В. Пантюхин*<sup>2</sup>  
 zagoruyko2@mail.ru, dim\_beavis@mail.ru

<sup>1</sup> Московский государственный технический университет  
 им. Н.Э. Баумана

<sup>2</sup> Московский физико-технический институт  
 (государственный университет)

### Структура памяти нейронной сети. Алгоритм прямого обучения

В работе [1] описана структура нейронной сети СМАС (Cerebellar Model Articulation Controller). Как и любая нейронная сеть, СМАС предназначена для запоминания и восстановления функций  $N$  переменных. Наиболее существенными отличиями СМАС от других нейронных сетей являются следующие.

1. Аргументы запоминаемой и воспроизводимой функций принимают только дискретные значения.

2. Нелинейное преобразование аргументов функции происходит неявно с помощью алгоритма вычисления адресов ячеек ассоциативной памяти, в которых хранятся числа, определяющие значение функции.

В нейронной сети СМАС предполагается, что каждый входной сигнал (аргумент функции) возбуждает, или делает активными, ровно  $y(x)$  ячеек памяти, по одной в каждом слое, суммарное содержание которых равно значению запоминаемой функции.

Разработан алгоритм прямого обучения, в котором в каждую ячейку памяти записывается значение  $f(\chi)$ , где  $\chi$  — значения ячеек гиперкуба, соответствующего данной ячейке памяти. Функция  $f(\chi)$  задает аппроксимационные свойства сети.

В общем виде алгоритм прямого обучения выглядит следующим образом.

1. Для одной ячейки вектора памяти вычисляем ее координаты в многомерном базисе.
2. Находим координаты опорной точки гиперкуба, соответствующего координатам ячейки в многомерном базисе.
3. Находим остальные точки гиперкуба, отбрасываем выходящие за границы.
4. По найденным координатам точек гиперкуба находим  $f(\chi)$  и записываем в данную ячейку.
5. Повторяем шаги 1–4 для всех остальных ячеек вектора памяти.

Проведенные исследования по распознаванию трех классов сложной формы показали, что СМАС убирает помеху лучше, чем многослойная сеть. При этом сложность алгоритмов СМАС ниже, а обучение происходит всего за один этап обучения.

Основные преимущества алгоритма: простота по сравнению с другими методами, хорошие аппроксимационные свойства, возможность распараллеливания вычислений.

Также на основе приведенного алгоритма предлагается способ изменения размеров памяти, который может послужить основой для создания новых алгоритмов обучения.

### Литература

1. *Аведьян Э.Д.* Ассоциативная нейронная сеть СМАС. Часть 1. // Информационные технологии. — 1997. — № 3. — С. 6–14.

2. *Haykin S.* Neural Networks: A comprehensive foundation, second edition. — Prentice-Hall, 1999. — 842 с.

УДК 004.891.3

*С.А. Красников, А.М. Любовский*

skrasnikov@gmail.com, kit2202@yandex.ru

Московский государственный университет технологий и управления

### Принципы построения экспертных систем экспресс-идентификации и контроля углеводородных соединений на основе спектрального анализа

Известно, что инфракрасные (ИК) спектры углеводородных соединений (УВС) весьма похожи — они не содержат характерные пики, по которым легко идентифицировать или определять принадлежность материала к конкретной марке.

Поэтому для идентификации марок УВС и определения показателей их качества по ИК-спектрам необходимы специальные алгоритмы и специализированные информационно-измерительные системы [1, 2].

Для идентификации марок УВС и количественного оценивания показателей их качества разработана экспертная система с элементами искусственного интеллекта.

Для решения в данной системе задач экспресс-контроля УВС используется следующая разработанная информационная технология.

1. Создаются три синхронные базы данных (БД).

Первая БД — база данных ИК-спектров УВС.

Вторая БД — база данных ИК-спектров вредных примесей (толуол, бензол, ароматические соединения), которые потенциально могут войти в состав анализируемых образцов УВС.

Третья БД — база данных показателей качества УВС, измеренных физико-химическими методами.

2. Создается база знаний (БЗ), включающая:

2.1. Алгоритмы режекторной фильтрации, вырезающие неинформативные значения спектров и линии атмосферного поглощения (паров воды и углекислого газа);

2.2. Алгоритм идентификации марки неизвестного образца УВС;

2.3. Алгоритм непараметрического оценивания показателей качества по идентифицированному спектру неизвестного образца УВС;

2.4. Алгоритм нелинейного параметрического оценивания показателей качества по идентифицированному спектру неизвестного образца УВС;

2.5. Синхронную БД, включающую спектры УВС и соответствующие им известные объемные концентрации примесей;

2.6. Алгоритм нелинейного параметрического оценивания молярных концентраций примесей, входящих в состав неизвестного образца УВС, по измеренным спектрам;

2.7. Алгоритм нелинейного параметрического оценивания объемных концентраций по оцененным молярным концентрациям.

Рассмотренная информационная технология реализована программными средствами и предназначена для работы в составе отечественных ИК-спектрометров серии АФ и ПАК [2].

### Литература

1. Краснов А.Е., Воробьева А.В., Кузнецова Ю.Г., Красников С.А., Краснова Н.А. Основы спектральной компьютерной каллиметрии жидких сред. — М.: Издательский дом «Юриспруденция», 2006.

2. Краснов А.Е., Красников С.А., Анискин Д.Ю., Вагин В.А. Способ идентификации и контроля качества многокомпонентных соединений. Патент РФ № 2334971, 2008.

*А.И. Черноиванов, А.В. Королькова*

atcher@sci.pfu.edu.ru, akorolkova@sci.pfu.edu.ru

Российский университет дружбы народов

### Модель процесса передачи с регулированием по алгоритму типа RED динамической интенсивности потока. Сравнительный анализ для случаев TCP-Reno и TCP-NewReno трафика

Рассмотрена модель процесса передачи [1, 2], в которой для регулирования интенсивности потока, передаваемого по протоколу TCP-NewReno [3], применяется алгоритм типа RED (Random Early Detection) [4]. Цель работы — сравнительный анализ модели для случаев TCP-Reno (рассмотрен в [1]) и TCP-NewReno трафика. Математическое описание динамики модели с TCP-NewReno потоком, как и в [1], получено с помощью аппарата стохастических дифференциальных уравнений с пуассоновским процессом в виде автономной, нелинейной системы обыкновенных дифференциальных уравнений с разрывной правой частью и учетом запаздывания передачи от источника до получателя (пояснение параметров системы см. в [1]):

$$\begin{aligned} \frac{dE[w(t)]}{dt} &= \frac{I(w_{\max} - E[w(t)])}{E[T(t)]} + I(w(t) - 1) \left[ \left( -\frac{E[w(t)]}{2} \right) E[\gamma(t)] \times \right. \\ &\quad \left. \times (1 - E[P_{TO}(w(t - \tau))]) E[p(\hat{q}(t - \tau))] + \right. \\ &\quad \left. + (1 - E[w(t)]) E[\gamma(t)] E[P_{TO}(w(t - \tau))] E[p(\hat{q}(t - \tau))] \right], \\ \frac{dE[q(t)]}{dt} &= I(R - E[q(t)]) \frac{E[w(t)]}{E[T(t)]} (1 - E[p(\hat{q}(t))]) - E[C(t)], \\ \frac{dE[\hat{q}(t)]}{dt} &= \frac{\ln(1 - w_q)}{\delta} E[\hat{q}(t)] - \frac{\ln(1 - w_q)}{\delta} E[q(t)], \\ \gamma(t) &= \frac{1 - (1 - p(\hat{q}(t - \tau)))^{T(t) \frac{w(t - \tau)}{T(t - \tau)}}}{T(t)}. \end{aligned}$$

Отличие состоит в первом уравнении модели, которое в данном случае учитывает принципы функционирования протокола TCP-NewReno [3] и для которого в отличие от уравнения для TCP-Reno

потока (см. [1]) учет запаздывания существенен из-за структуры уравнения.

Проведенный с помощью разработанного для вычислительного эксперимента комплекса программ анализ показал, что в модели с TCP-NewReno трафиком амплитуда колебаний больше (рис. 1, рис. 2), чем в случае TCP-Reno (рис. 3, рис. 4).

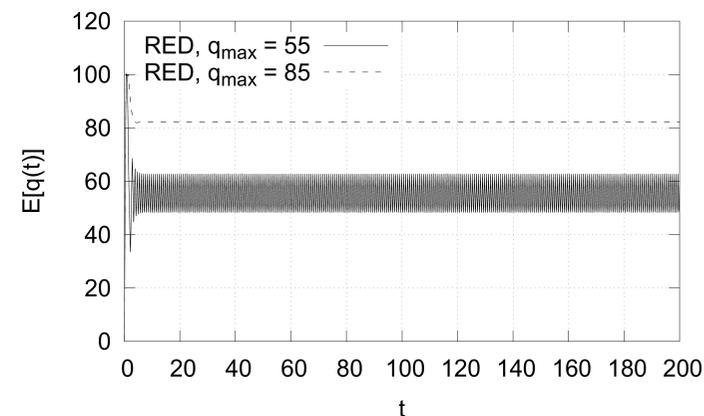


Рис. 1

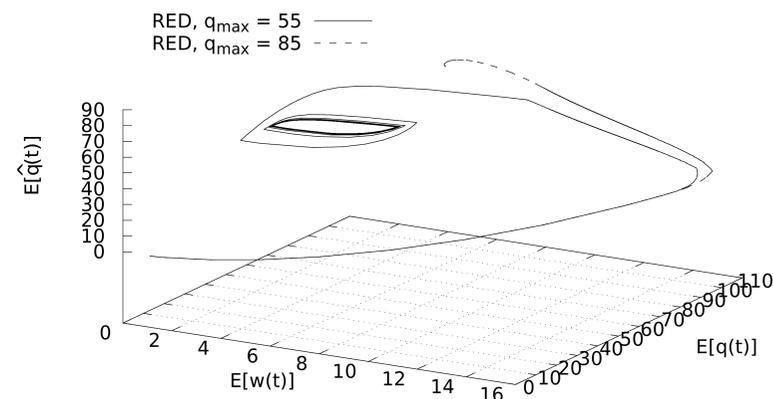


Рис. 2

### Литература

1. Королькова А.В., Кулябов Д.С. Математическая модель динамики поведения параметров систем типа RED // Вестник РУДН.

Серия «Математика. Информатика. Физика». — 2010. — № 2(1). — С. 54–64.

2. *Королькова А.В., Черноиванов А.И.* Использование стохастических дифференциальных уравнений для моделирования поведения TCP-трафика при взаимодействии с узлом, работающим по алгоритму RED // XVII конференция серии «Математика. Компьютер. Образование». — Дубна, 2010. — С. 138.

3. *Floyd S., Henderson T.* RFC2582-The NewReno Modification to TCP's Fast Recovery Algorithm // IETF. — 1999.

4. *Floyd S., Jacobson V.* Random Early Gateways for Congestion Avoidance // IEEE. — 1993.

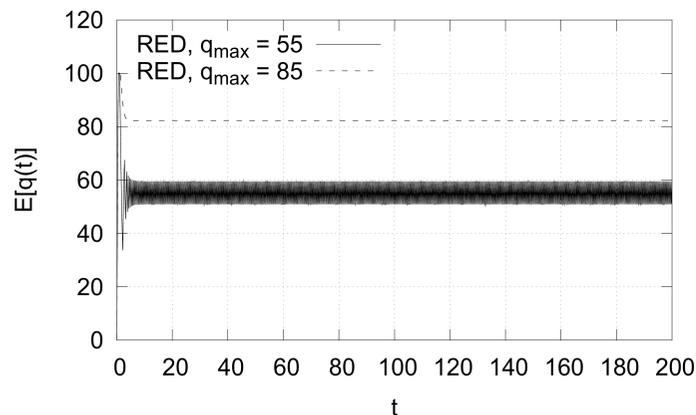


Рис. 3

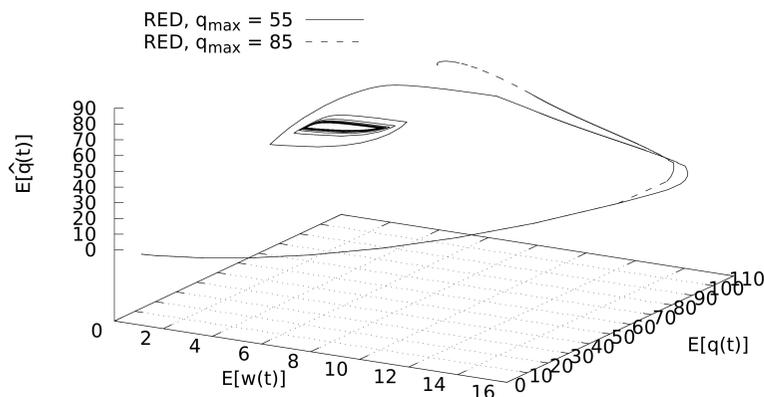


Рис. 4

## Секция инфокоммуникационных систем и сетей

УДК 004.896

*А.В. Васильев*

zolenenok@gmail.com

Московский физико-технический институт  
(государственный университет)

### Решение задачи оптимизации краткосрочного расписания с применением генетических алгоритмов

В работе рассматривается реальная задача, возникшая из практики телекоммуникационных компаний, предлагающих своим клиентам услуги, для предоставления которых необходимо выполнение разного рода работ, в том числе на стороне клиента.

Типичная телекоммуникационная компания предоставляет достаточно широкий спектр услуг и держит в штате работников различных специальностей, которые обладают необходимыми знаниями и навыками для выполнения всего спектра работ. Все работы производятся в некоторой ограниченной, но все же весьма крупной области (например, в черте города), и для того, чтобы после выполнения одной работы специалист мог приступить к другой задаче, ему необходимо переместиться в пространстве к месту проведения очередных работ, что связано с финансовыми затратами (топливо, амортизация транспорта), временными затратами (время в пути). Также необходимо обеспечить выполнение работы в оговоренный с клиентом временной период. Это условие состоит в ограничении на максимальное и минимальное время для блока работы.

Как уже упоминалось, множество мест проведения работ (адресов клиентов) задано в части города, площадь которой может достигать нескольких сотен километров. Однако специфика работ в телекоммуникационной индустрии предполагает наличие связанных между

собой работ, которые должны быть выполнены именно в нужном порядке; мы не можем выполнить следующую задачу, пока не закончится выполнение первой. Также важно, что подзадачи могут (а скорее всего и должны) быть выполнены специалистами, обладающими соответствующими подзадачам знаниями и навыками, притом в различных точках города.

Перейдем к более формализованной постановке задачи. Введем понятие блока работ  $B_i$  или блока подзадач — то есть набора подзадач  $T_{ij}$ , выполнение которых упорядочено:  $B_i = \{T_{i1}, T_{i2}, \dots\}$ . Общая система заданий для заданного набора ресурсов может быть определена как система из блоков подзадач. Все блоки внутри множества являются независимыми и могут быть исполнены в произвольном порядке:  $B = \{B_1, B_2, \dots\}$ . Однако внутри блока подзадачи упорядочены. В терминах предыдущего примера блок — это, например, может быть подключение клиента к сети Интернет (work order). Блок распадается на три подзадачи: физическая установка оборудования у клиента, работы на стороне провайдера (настройки оборудования), проверка и настройка оборудования на стороне клиента. Тут выполнение каждой подзадачи не может быть начато раньше, чем будет закончено выполнение предыдущей подзадачи. Подзадачи внутри одного блока могут решать разные специалисты.

Каждая подзадача (или задание) характеризуется продолжительностью и требованиями к профессиональным качествам (специализация, квалификация), которыми должен обладать сотрудник, чтобы быть способным ее решить. Мы не можем назначить задачу сотруднику, если сотрудник не обладает должной квалификацией. Продолжительность имеет несколько стандартных значений для данного типа работ, и они заранее известны. Также для решения задачи может требоваться несколько навыков. Мы будем понимать, что задание — это минимальная единица работы, которая может быть поручена одному человеку. Решение задачи — сопоставление каждому сотруднику  $E_i$  списка задач, которые он должен решить в течение дня:  $E_k \leftrightarrow \{T_{lm}; l = \{l_1, l_2, \dots\}, m = \{m_1, m_2, \dots\}\}$ .

Если сотруднику нужно переместиться к новому месту работ, то он должен потратить время, пропорциональное расстоянию, для простоты его скорость мы будем считать заданной. То есть время, затраченное на перемещение пропорционально  $\text{loc}(T_1) - \text{loc}(T_2)$ , где  $T_1$  и  $T_2$  — начальная и последующая подзадачи соответственно; функция  $\text{loc}$  — отражает физическое расположение задачи на карте, и разность

двух мест на карте определяется картами дорог (функцию  $\text{loc}$  можно считать заданной по таблицам).

Также мы считаем, что для каждого блока могут быть определены время начала и время окончания, которые расположены в течение одного рабочего дня. В модели это принято как время начала для первой подзадачи и время окончания для последней подзадачи внутри блока.

Каждый сотрудник характеризуется навыками, которыми он обладает, а также календарем работы (рабочими часами). Мы не можем назначить задачу сотруднику, если время ее выполнения находится вне его календаря.

Наша задача состоит в уменьшении временных затрат посредством уменьшения перемещения сотрудников по городу. При этом сотрудники должны быть назначены правильно.

Целевая функция, значение которой необходимо минимизировать, — это сумма пройденных путей сотрудниками в ходе решения поставленных задач. Минимизация данной функции в нашей постановке означает минимизацию затрат компании и является целевым решением: эту функцию можно посчитать каноническими методами [2], но решение задачи в таком случае занимает большее время и может не обеспечить требуемую точность. В работе предлагается иной подход к решению этой задачи.

В данной работе новым является исследование возможности применения описанного метода к задаче составления оптимального расписания и резервирования ресурсов. Предлагаемая модель работ основана на реальных данных, которые взяты из практики телекоммуникационных компаний и отображают естественное поведение систем. Данная задача востребована современными компаниями, а предложенный метод является удачным решением для задач подобного класса.

## Литература

1. Кофман Э.Г. Теория расписаний и вычислительные машины. — М.: Наука, 1984.
2. Вагнер Г. Основы исследования операций. — М.: Мир, 1972.

УДК 616.831-073.97

*Д.С. Давидюк*

d@qwe.ru

Московский физико-технический институт  
(государственный университет)

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

**Спектральный метод анализа  
электроэнцефалограмм**

Предлагается метод, который в перспективе поможет врачам ставить начальный диагноз неврологических заболеваний. Метод работает с данными ЭЭГ пациента. Сначала находятся коэффициенты разложения сигналов с датчиков в ряд Фурье, затем к этим коэффициентам применяется критерий, сформулированный на языке статистических гипотез для данной болезни и для данного датчика, и определяется, болен ли пациент этой болезнью. Критерий формулируется на основе сравнения ЭЭГ больных (пораженных данной болезнью) и здоровых людей.

Сигнал от каждого электрода разлагается в ряд Фурье:

$$s(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} \left( a_k \cos \frac{k\pi t}{l} + b_k \sin \frac{k\pi t}{l} \right),$$

где коэффициенты

$$a_k, b_k$$

определяются по следующим формулам:

$$a_0 = \frac{1}{l} \int_{-l}^l s(t) dt, \quad a_k = \frac{1}{l} \int_{-l}^l s(t) \cos \frac{k\pi t}{l} dt,$$

$$b_k = \frac{1}{l} \int_{-l}^l s(t) \sin \frac{k\pi t}{l} dt.$$

Величина  $\sqrt{a_k^2 + b_k^2}$  наносится на график в зависимости от частоты, причем для ЭЭГ больных людей соответствующая точка окрашивается в красный цвет (либо наносится как плюс), для ЭЭГ здоровых —

в синий (наносится в виде кружка). Далее выбирается критическая область как объединение поверхности, внутри которой находится достаточно много красных точек (плюсов) и относительно мало синих (кружков), и максимально допустимого числа точек внутри этой поверхности. Таким образом, получаем набор критических областей (по одной для каждого электрода) для рассматриваемой болезни. На рис. 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 и 8 приведены примеры таких областей для болезни Паркинсона.

Теперь, чтобы с некоторой вероятностью выяснить, болен ли пациент данной болезнью, необходимо посмотреть, сколько точек  $\sqrt{a_k^2 + b_k^2}$ , полученных из его (ее) ЭЭГ, попадает в область, ограниченную критической поверхностью. Если число таких точек больше установленного выше, то можно идентифицировать пациента как больного.

**Литература**

1. Тер-Крикоров А.М., Шабунин М.И. Курс математического анализа. — М.: Физматлит, 2001. — 672 с.

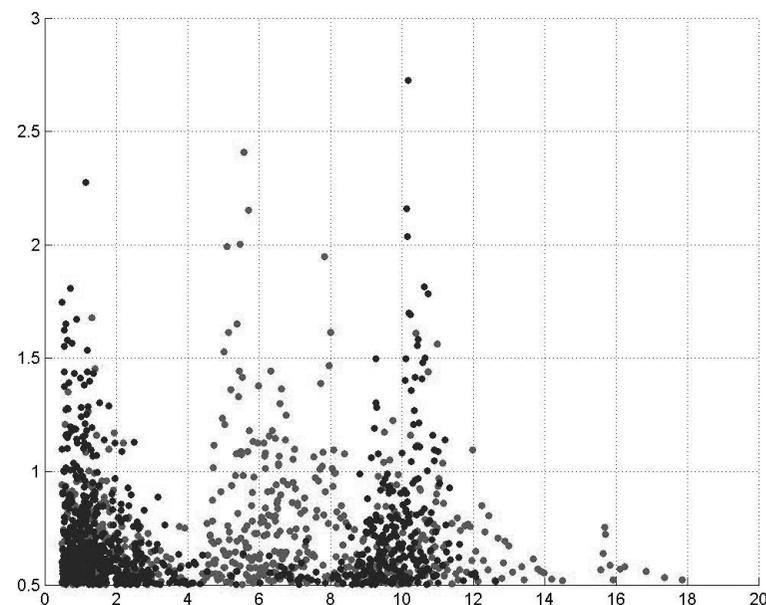


Рис. 1

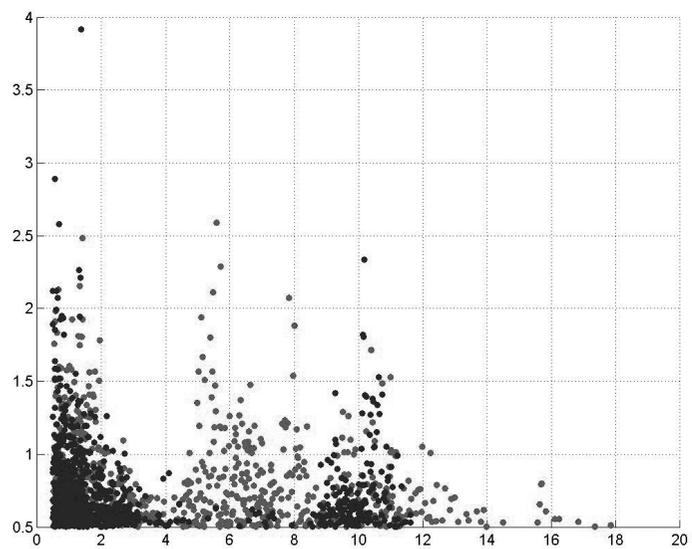


Рис. 2

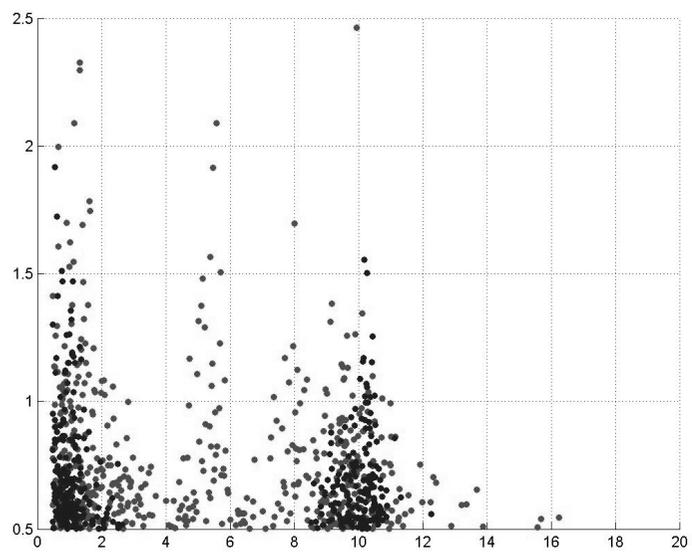


Рис. 3

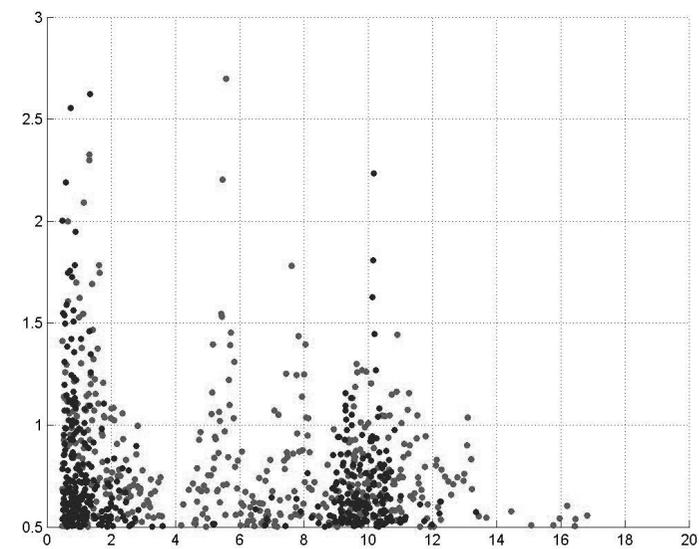


Рис. 4

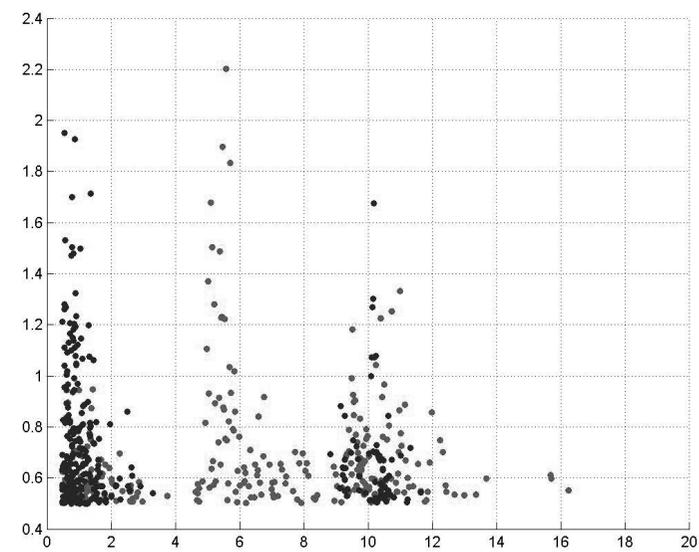


Рис. 5

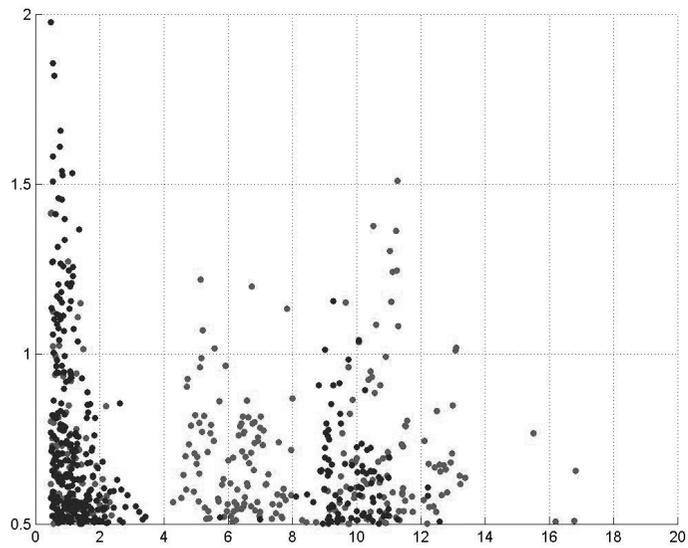


Рис. 6

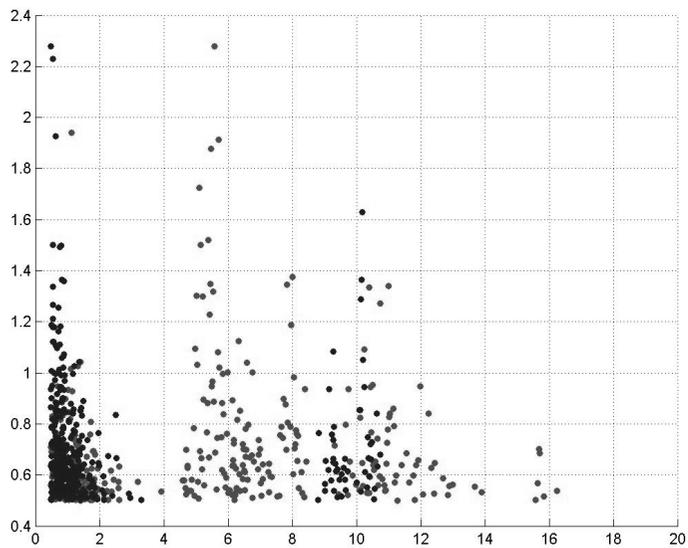


Рис. 7

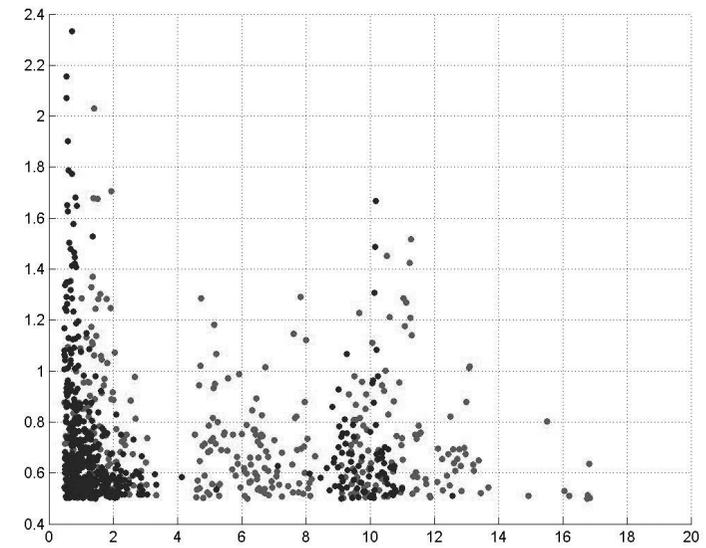


Рис. 8

УДК 004.725.5

*А.О. Дугин*

[andrew.dugin@gmail.com](mailto:andrew.dugin@gmail.com)

Украинский научно-исследовательский институт связи  
ПраО «МТС Украина»

### **Практические аспекты управления инфраструктурой сетевого анализа**

В качестве показателей работы корпоративной сети может служить сетевой трафик, генерируемый пользователями и серверными фермами, а также служебный трафик всех устройств. В больших компаниях общий объем сетевого трафика настолько велик, что для проведения его анализа и использования результатов в зависимости от целей необходимо использование мощных анализаторов, систем определения сетевых аномалий, систем обнаружения и предотвращения вторжений и других типов сетевых сенсоров. Соответственно,

следует просчитать возможные ошибки на каждом этапе жизненного цикла инфраструктуры сетевого анализа.

На этапе проектирования необходимо правильно рассчитать пропускную способность интерфейсов коммутаторов, на которые «зеркалируется» трафик, с целью принятия решения об использовании на каждом участке сети сенсора определенной мощности и, соответственно стоимости.

На стадии внедрения определяется соответствие заявленных поставщиком характеристик сетевых сенсоров реальности с учетом специфики данной корпоративной сети, также может возникнуть необходимость реорганизации инфраструктуры в связи с ошибками проектирования.

На этапе эксплуатации необходимо использование возможности анализа трафика для получения информации о текущем состоянии корпоративной сети, возможных произведенных без согласования реорганизациях инфраструктуры либо авариях, а также принятия решения о методах решения возможных ошибок проектирования.

Для оперативного реагирования на изменения в сетевом трафике и возможные сбои оборудования достаточно использовать один дополнительный сервер, который по стандартным протоколам сможет осуществлять вспомогательную функцию мониторинга независимо от производителя оборудования. Также может возникнуть необходимость использования результатов анализа трафика несколькими подразделениями для повышения качества выполнения своих задач. С данной целью устанавливаются дополнительные сервера мониторинга, на которые необходимая информация поступает в виде трапов SNMP. Дополнительные сервера мониторинга экономически целесообразно реализовывать на свободно распространяемом ПО, в то время как основные системы управления, предоставляемые поставщиком решений, должны гарантировать получение всех типов событий по защищенному каналу по протоколу транспортного уровня TCP.

На основании изложенного в докладе представлена рекомендованная автором архитектура участка корпоративной сети с использованием сетевых сенсоров и распределением получаемой от них информации для эффективной обработки каждым подразделением компании. В докладе описываются практические аспекты проектирования и эксплуатации инфраструктуры сетевого анализа, возможности использования результатов анализа трафика IP-сетей для управления информационными системами.

УДК 004.652

*Д.В. Мясников*

*dmitry.myasnikov@phystech.edu*

Московский физико-технический институт  
(государственный университет)  
ООО «НетКрэкер»

### **Анализ трудоемкости и производительности подходов к хранению данных на основе метамоделей**

В настоящее время для хранения данных в большинстве случаев применяются реляционные базы данных (РБД), которые не удобны для хранения объектных данных. Однако на данный момент нет конкурентоспособной замены РБД, поэтому существуют различные подходы для хранения объектных данных в РБД. Такой подход, основанный на одном из вариантов метамоделей [1], в данной работе сравнивается с классическим реляционным подходом (Representing Objects as Tables, ROT) с точки зрения производительности, а также трудоемкости реализации.

При разработке современных информационных систем выбор подхода происходит обычно на основе интуитивных соображений и качественных оценок, а среди количественных параметров присутствует только производительность. Но сложность, а значит, и стоимость поддержки созданной подсистемы хранения данных зависят от сложности исходного кода на ЯПВУ и SQL, поэтому этот параметр также стоит оценивать количественно.

Для оценки сложности в первом случае можно применить множество общеизвестных метрик, например метрики LOC, McCabe Cyclomatic Complexity из [2]. Для SQL существует мало подходов. Одна из метрик, позволяющих оценивать сложность SQL, — это AV-Graph, предложенная в [3]. В общем случае только одна из частей этой метрики — сложность структуры — не связана с характеристиками самих данных. Однако даже эта метрика требует некоторых улучшений для применения к анализу трудоемкости написания произвольных инструкций SQL.

Проведенное исследование наиболее популярных подходов — модели ROT и общей метамоделей — дало результаты, свидетельствующие

о более высокой производительности (рис. 1а) и более низкой сложности кода (рис. 1б) подхода ROT, что согласуется с [4]. По обоим критериям наблюдается отличие в среднем в 2 раза (усреднено по нескольким типам запросов). Несмотря на это, второй подход является более универсальным, поскольку он позволяет работать с произвольными объектными моделями без изменений в программной части. Если исключить из рассмотрения запросы на модификацию данных и запросы, которые не поддерживаются моделью ROT, средние сложности SQL-кода для рассмотренных подходов практически совпадают.

Результаты данной работы планируется применить для создания автоматизированной методики многокритериального выбора подхода к хранению данных в информационных системах.

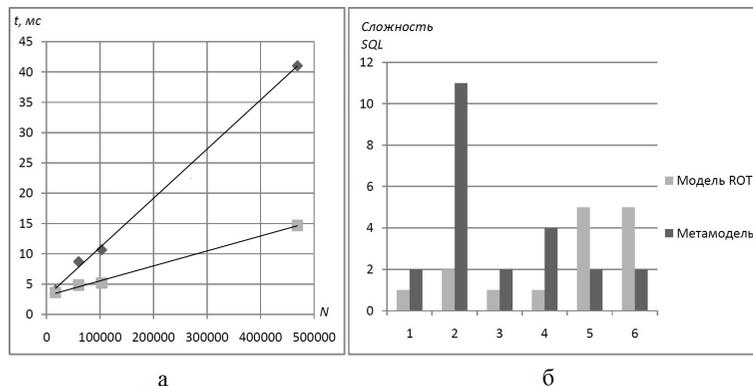


Рис. 1. Зависимость времени поиска файла от количества файлов в БД (а) и диаграмма сложности запросов (б)

## Литература

1. *Тенцер А.* База данных — хранилище объектов // Компьютер-Пресс. — 2001. — № 8.
2. *Sneed H.M.* Measuring 75 Million Lines of Code // International Workshop on Software Measurement (IWSM). — 2008. — P. 271–286.
3. *Pataki N., Simon M., Porkolab Z.* The AV-graph in SQL-Based Environment // 12th ECOOP Workshop on Quantitative Approaches in Object-Oriented Software Engineering (QAOOSE 2008). — 2008. — P. 11–20.
4. *Змеев О.А., Мусеев А.Н.* Сравнительный анализ некоторых методов O-R преобразования // Вестник ТГУ. — 2003. — № 280. — С. 263–271.

УДК 004.052.32

*И.Ю. Орлов*

orloviy@yandex.ru

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

## Двусторонний подход к понятию надежности интернет-ресурсов и методам ее повышения

В настоящее время технические и информационные понятия «надежности» рассматриваются отдельно. Проблема надежности актуальна для интернет-ресурсов с высокой посещаемостью, в связи с чем возникает необходимость изучения данных понятий во взаимосвязи.

Степень технической надежности определяется показателями, связанными с явлением отказа — случайным событием, заключающимся в нарушении работоспособности системы. Вероятностью отказа ( $Vo$ )  $Q(t)$  является вероятность того, что при определенных условиях эксплуатации в заданном интервале времени возникнет хотя бы один отказ [1]. Основной количественной характеристикой надежности является коэффициент готовности согласно рекомендациям ITU-T G.602 [2]:

$$Kг = T_0 / (T_0 + t_v),$$

где  $T_0$  — средняя наработка до отказа, а  $t_v$  — среднее время восстановления работоспособного состояния.

Техническая надежность является комплексным свойством системы, требующим специальных конструктивных, производственных и эксплуатационных методов. Для Интернет-ресурсов с высокой посещаемостью также большое значение имеют технологии транспортировки информации, например, технология мультиплексирования по длине волны (WDM) [3].

Кроме понятия технической надежности интернет-ресурса существует и понятие его информационной надежности, которая рассматривается отдельно информационными поисковыми системами и конкретными пользователями, являясь показателем качества ресурса. С точки зрения поисковой системы, чем больше ссылок посторонних ресурсов на данный сайт, тем выше его «уровень надежности» [4]. Для пользователей показатель информационной надежности связан с появлением нужной информации на одной из первых страниц при поиске. Таким образом, второй составляющей повышения надежности

интернет-ресурса является повышение его информационной надежности, которое связано с маркетинговыми методами и сертификацией ресурса и непосредственно влияет на ценность данного ресурса в качестве пакета информационных услуг.

Комплексный подход к повышению надежности позволит увеличить количество посетителей ресурса и их удовлетворенность полученной информационной услугой (рис. 1, 2).

### Литература

1. *Владов Ю.* Автоматизированный логико-вероятностный расчет надежности технических систем. — Оренбург: ГОУ ОГУ, 2005.
2. *Чепак В.С.* Исследование и разработка механизмов обеспечения надежности транспортной телекоммуникационной сети для городов-миллионников // Автореферат диссертации кандидата технических наук. — URL: <http://masters.donntu.edu.ua/2009/kita/chepak/diss/index.htm>
3. *Слепов Н.Н.* Особенности современной технологии WDM. — URL: <http://www.electronics.ru/issue/2004/6/19>
4. *Евдокимов Н.* Поисковая оптимизация: дальше, больше, быстрее // Советник. — 2006. — № 4. — С.16–18.



Рис. 1. Виды и взаимосвязь методов повышения надежности информационных систем



Рис. 2. Взаимозависимость групп методов повышения надежности интернет-ресурса

УДК 004.021

*А.Ю. Тутов<sup>1,2</sup>, Р.В. Железов<sup>2</sup>*

*belindr@rt.mipt.ru, ironromeo@mail.ru*

<sup>1</sup> Московский физико-технический институт  
(государственный университет)

<sup>2</sup> ЗАО «Когнитивные технологии»

### Разработка эффективного алгоритма кэширования запросов к провайдерам данных для системы «Маршруты» с целью повышения качества обслуживания пользователей

Система «Маршруты» предоставляет подробную справочную информацию пассажиру о возможности проезда на наземном и воздушном транспорте с пересадками, включая подбор оптимальных пунктов пересадки, поиск по различным критериям (время в пути, стоимость) [1, 2]. Одним из методов решения проблем, возникающих в связи с увеличением объема данных и количества запросов к системе, является кэширование результатов запросов к внешним системам.

В работе проведено исследование только пассажирского железнодорожного транспорта дальнего следования. В кэш-таблице сохраняются данные о направлении, то есть откуда и куда пользователь запрашивает информацию, дате отправления, количестве поездов по выбранному направлению, минимальной стоимости проезда, времени запроса. Кэширование приводит к уменьшению количества запросов к внешним провайдерам, сокращению времени ответа системы, но при этом появляется ряд новых проблем. Если кэшировать все запросы, то размер таблицы составит несколько миллионов записей. Кроме того, необходимо учитывать специфику данных, которые будут кэшироваться. По мере приближения даты отправления поезда количество свободных мест уменьшается. И при исчезновении свободных мест на самую дешевую категорию увеличивается минимальная стоимость проезда на данном поезде. При этом запись, которая хранится в кэш-таблице, становится неверной, так как в ней сохранена уже недействительная цена.

В данной работе предложен специализированный алгоритм кэширования на основе алгоритма FIFO, использующий автоматическое удаление некорректных записей и данные об оставшемся количестве свободных мест.

Предложенный алгоритм кэширования сократил количество ошибок (устаревших данных) в кэш-таблице в 20 раз, уменьшил размер кэш-таблицы на 7%, при этом среднее время ответа системы увеличилось незначительно. Дальнейшие исследования по этой теме должны быть направлены на то, чтобы снизить среднее время ожидания пользователя.

### Литература

1. *Железов Р.В.* Разработка и исследование информационно-справочной системы поиска оптимальных путей проезда на пассажирском транспорте: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. — М.: МФТИ, 2009.
2. Интернет-портал доступа к справочной системе «Маршруты»: <http://transport.marshruty.ru/>
3. *Williams S., Abrams M., Standridge C.R.* Removal Policies in Network Caches for World-Wide Web Documents in 'Proceedings of the ACM SIGCOMM '96', Stanford University. — 1996.
4. *Coffman J.E.G., Denning P.J.* Operating Systems Theory. — Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall, 1973. — P. 282.

5. *Megiddo N., Modha D.S.* Outperforming LRU with an Adaptive Replacement Cache Algorithm // IEEE Computer Magazine. — 2004. — P. 58–65.

6. *Robinson J.T., Devarakonda M.V.* Data Cache Management Using Frequency-Based Replacement // Proc. ACM SIGMETRICS Conf., ACM Press. — 1990. — P. 134–142.

УДК 004.652

*А.В. Шевцов<sup>1,2</sup>, И.Г. Нарыжнский<sup>2</sup>*

*led@frtk.ru, ilia@ydn.ru*

<sup>1</sup> Московский физико-технический институт

(государственный университет)

<sup>2</sup> ООО «НетКрэкер»

### Key–Value системы и их применение к моделям с наследованием структуры данных

Кроме реляционных баз данных (БД) существует множество других типов БД, нацеленных на решение различных задач [1]. Особо стоит выделить недавно появившиеся key-value системы [2], хранящие простое соответствие значения ключу и характеризующиеся простотой построения распределенных систем. В данной работе key-value системы теоретически и экспериментально исследуются в сочетании с двумя подходами к хранению объектов с помощью метамodelей.

Для хранения в любой базе данных реальные данные необходимо преобразовывать из их программного представления в сущности базы данных и обратно. Универсальный способ таких преобразований — метамодели данных. Классические метамодели [3] оперируют несколькими основными сущностями: объект, объектный тип, атрибут, атрибутный тип. Метамодель с наследованием структуры данных, изображенная на рис. 1, содержит всего одну сущность — объект, — одновременно выполняющую функции и объекта, и атрибута, и объектного типа.

При реализации любой модели данных с использованием key-value остро встает проблема невозможности обращения ссылок, что затрудняет поиск объектов по значениям атрибута или получение списка дочерних объектов. Для решения проблемы дополнительно для каждой ссылки, которую необходимо уметь обращаться, на каждом объекте

поддерживается список объектов, ссылающихся на него. Модель с наследованием структуры данных более удобна для переноса с РБД на key-value ввиду меньшего количества сущностей по сравнению с классической, а также по сравнению с ней представляет намного большие возможности.

Для измерения производительности был создан набор тестов для основных операций и один общий тест. Результаты измерений показали превосходство исследуемого подхода при работе с объектами с известными идентификаторами, к примеру, чтение объекта занимает 0,5 мс против 3 мс при использовании РБД. Также исследуемый подход превосходит классическую модель в операциях, связанных с небольшими списками (размер порядка ста), но уступил модели с наследованием структуры данных, реализованной с использованием РБД (см. рис. 2). Как и ожидалось, подход показал низкую производительность в операциях поиска объекта по значению параметра.

Таким образом, исследованный подход выгоден в системах, где редко приходится искать объект по его параметрам среди большого числа объектов. При работе же с иерархическими структурами с небольшим коэффициентом ветвления разработанная система оказывается выгодна.

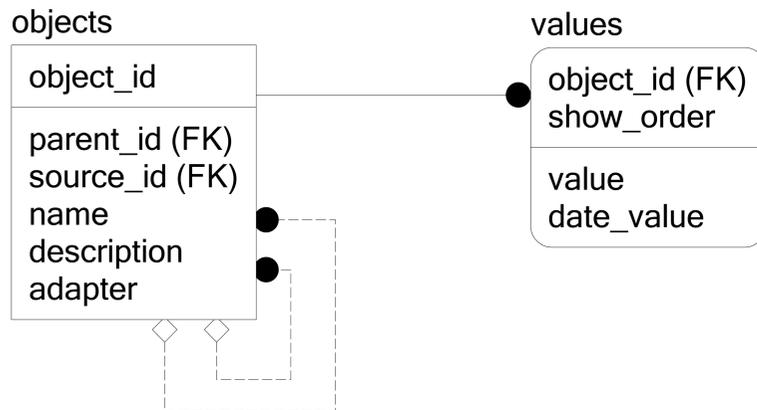


Рис. 1. Мета модель с наследованием структуры данных

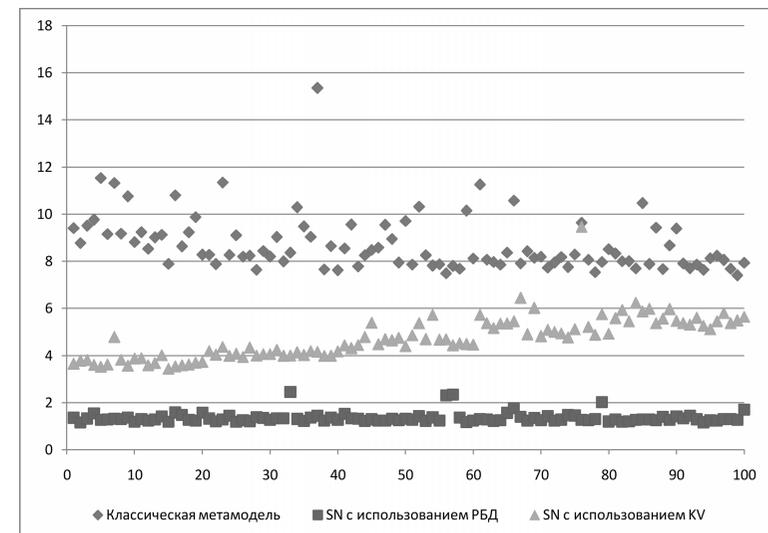


Рис. 2. Зависимость времени создания дочернего объекта от количества соседей

### Литература

1. Дейт К.Д. Введение в системы баз данных. — М.: Вильямс, 2005.
2. Rescorla Eric. Introduction to Distributed Hash Tables. — Dallas, TX, USA: IAB Plenary, IETF 65, 2006.
3. Тенцер А. База данных — хранилище объектов // Компьютер-Пресс. — 2001. — № 8.

УДК 681.5.015

*А.О. Шкорута*

ashkoruta@gmail.com

Московский физико-технический институт  
(государственный университет)**Генетический алгоритм в задаче многоступенчатой идентификации систем**

Существенной частью проблемы управления как такового является проблема идентификации. Часто задачу идентификации можно математически сформулировать следующим образом: требуется при данных ограничениях оптимизировать некий критерий заданного вида

$$J(F(\vec{X}) - \hat{F}(\vec{X})) \rightarrow \min,$$

где  $\vec{X}$  — вектор параметров,  $F(\vec{X})$  — оператор системы (связь между выходом и переменными состояния),  $\hat{F}(\vec{X})$  — оператор модели,  $J$  — некоторый функционал, выполняющий роль меры. В случае параметрической идентификации задача сводится к оптимизации критерия по набору параметров, от которых зависят уравнения системы.

В связи с ростом количества вычислений для осуществления идентификации ведется активное исследование альтернативных методов поиска решения, в т.ч. генетических (эволюционных) алгоритмов.

В данной работе непрерывный генетический алгоритм с операторами рулеточной селекции, комбинации равномерного и одноточечного кроссовера и векторной мутации, описанными в [1], используется для решения задачи идентификации линейной системы методом многоступенчатой идентификации, описанным в [2]: требуется прогнозировать значение неких непосредственно не измеряемых параметров по набору других параметров, которые в свою очередь также могут оказаться неизмеримыми, и так далее.

На каждом уровне с помощью генетического алгоритма ищутся коэффициенты линейных моделей:

$$Z_i^k = \sum_j C_{ij}^k Z_j^{k-1},$$

где  $Z_i^k$  — выходной сигнал  $i$ -й модели  $k$ -го уровня,  $Z_i^0 = X_i$  — входные сигналы,  $C_{ij}^k$  — коэффициенты  $i$ -й модели  $k$ -го уровня. В результате

получаем многоступенчатую линейную модель системы, построенную с применением генетического алгоритма.

**Литература**

1. *Mitchell M.* An introduction to genetic algorithms. — Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 1999.
2. *Иващенко А.Г.* Техническая кибернетика. — Киев: ГИТЛ УССР, 1962.

УДК 519.712.3

*А.В. Юдин*

a-y@bk.ru

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН  
Московский физико-технический институт  
(государственный университет)**Применение адаптивного фильтра Калмана для аппроксимации рассинхронизованных линейных систем**

В рамках исследования совместно с НИИ нейрохирургии им. Н.Н. Бурденко проводится изучение методов обработки электроэнцефалограмм. Результаты данного исследования могут помочь при распознавании артефактов на записях ЭЭГ, интерпретации реакций на внешние раздражители, определении различного рода приступов и т.д.

В качестве математической модели сигнала ЭЭГ рассматривались как единичный гармонический сигнал, так и сумма двух (трех и четырех) гармонических сигналов разных частот в смеси с белым шумом. Частоты выбирались из интервалов, соответствующих диапазонам основных ритмов головного мозга.

Для вычисления оценки параметров сигнала был выбран фильтр Калмана [1]. Этот фильтр хорошо работает, если исследуемый процесс не является стационарным, и позволяет получать оценку исследуемых параметров на каждом такте с учетом информации, поступившей в процессе наблюдения.

Для оценки неизвестных параметров системы был выбран псевдоградиентный алгоритм, предложенный в [2]. Этот алгоритм выгодно

отличается от других возможностью построения адаптивного фильтра, имеющего минимальную размерность и более высокую устойчивость [3].

При правильном подборе параметров фильтра (коэффициентов и начальных условий) алгоритм позволяет с хорошей точностью определять частоты основных ритмов и их амплитуду.

Алгоритм был опробован как на реальных записях электроэнцефалограмм, так и на тестовых сигналах с заранее известными параметрами.

### Литература

1. *Калман Р.Е., Бьюси Р.С.* Новые результаты в линейной фильтрации и теории предсказания // *Техническая механика*. — 1961. — Т. 83, сер. Д, № 1.
2. *Лубков А.В.* Адаптивная фильтрация: построение, исследование и применение фильтров // *Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук*. — М., 1977.
3. *Кицул П.И., Лубков А.В.* О синтезе псевдоградиентных алгоритмов настройки для адаптивного фильтра Калмана // *Автоматика и телемеханика*. — 1974. — № 4. — С. 61–65.

## Секция микропроцессорных технологий

УДК 004.318

*Ю.В. Байда*

yuri.baida@gmail.com

Московский физико-технический институт  
(государственный университет)  
ЗАО «Интел А/О»

### Программно-аппаратный симулятор процессора с векторным счетчиком инструкций на базе программируемых логических интегральных схем

В настоящее время в области разработки микропроцессоров постепенно происходит переход к архитектурам, существенно взаимодействующим с компиляторами [1]. Стало понятно, что микропроцессоры с суперскалярной архитектурой или с архитектурой широкого командного слова приблизились к своему теоретическому пределу производительности.

Одним из возможных перспективных направлений является микропроцессор с векторным счётчиком инструкций.

Реализация новой архитектуры требует большого количества решений, при принятии которых архитекторы существенно опираются на результаты имитационного моделирования. Традиционно в качестве модели используется специально разработанный программный потактовый симулятор. Такой симулятор, будучи достаточно точным и удобным в использовании, обладает катастрофически низкой производительностью. Наиболее быстрые реализации обладают эффективной тактовой частотой от 1 до 10 кГц [2]. При такой скорости моделирование двух минут процессорного времени заняло бы от одного до десяти лет работы симулятора, что делает невозможным исследовать производительность на реальных приложениях.

Использование программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) позволяет создать программно-аппаратный симулятор [3],

обладающий эффективной тактовой частотой от 1 до 10 МГц, что на три порядка выше эффективной частоты чисто программной модели.

В докладе обсуждаются особенности реализации и предварительные результаты разработки такого программно-аппаратного симулятора для микропроцессора с векторным счётчиком инструкций.

### Литература

1. *Kim H.S., Smith J.E.* An instruction set and microarchitecture for instruction level distributed processing // The 29th International Symposium on Computer Architecture. — 2002.

2. *Chiou D., Sanjeliwala D., Kim J.* [et al.]. The FAST methodology for high-speed SoC / computers simulation // Proceedings of International conference on computer-aided design. — 2007.

3. *Dave N., Pellauer M., Arvind, Emer J.* Implementing a functional / timing partitioned microprocessor simulator within FPGA // Proceedings of the workshop on architecture research using FPGA platforms. — 2006.

УДК 004.4'422

*М.Э. Закиров*

marat61@gmail.ru

Московский физико-технический институт

(государственный университет)

ЗАО «Интел А/О»

### Один подход к решению проблемы взаимоблокировок для архитектуры с распределенными вычислениями

Проблема взаимоблокировок — актуальная задача для современной теории и практики вычислений. Данная работа посвящена проблеме взаимоблокировок в многопоточной машине, а именно взаимоблокировкам по ресурсу исполнительных ресурсов.

Задавшись целью проанализировать взаимоблокировки, необходимо ответить на вопрос, чему соответствует взаимоблокировка на графе зависимостей. Очевидно, что это соответствует такому циклу, что

некоторый узел не может быть пройден из-за того, что в него входит обратная дуга зависимости, которая сама может быть пройдена только в поле данного узла.

Взаимоблокировки можно разделить на два вида, если говорить в терминах графа зависимостей:

- 1) те, что включают ресурсные дуги с динамической, неявной природой;
- 2) те, что не включают подобных дуг.

Взаимоблокировка второго типа является, по сути, результатом некорректного планирования операций (см. рис. 1, где пунктирной линией показаны зависимости по данным,  $f$  — инструкция порождения потока,  $e$  — инструкция окончания потока). Можно показать, что с применением РРО-нумерации исходного графа управления программы (с учетом правила «не проводить зависимости по данным от операции с большим номером в меньший») подобные взаимоблокировки становятся невозможными.

Взаимоблокировка первого типа сложнее и носит неявный характер, так как включает динамические ресурсные дуги (см. рис. 2), где двойной пунктирной линией обозначены гипотетические ресурсные дуги, не существующие одновременно. На рис. 2 видно, что в динамике может возникнуть ситуация, когда  $f_1$  пройдет первым, а для  $f_2$  устройств уже не останется. Решить данную проблему позволяет упорядочивание  $f_1 \rightarrow f_2$ , если исполнять их в таком порядке, то взаимоблокировка этого типа исключена. У второго вида взаимоблокировок существует подвид блокировки, который нельзя убрать упорядочиванием  $f$  — в таком виде взаимоблокировок циклический путь будет существовать в любом случае, вне зависимости от порядка исполнения, таким образом,  $f$ , находящиеся в такой сильно связанной компоненте, могут исполняться строго совместно — своего рода атом исполнения.

Атом — это набор потоков, существующих строго совместно. При этом атомы могут пересекаться и переходить один в другой. Главное свойство атома состоит в том, что упорядочивание операций  $f$  в нем не приводит к сокращению его ширины.

На рис. 3 показан атом размером четыре, так как сами операции  $f$  находятся в соответствующих потоках, и ресурсные дуги также их блокируют. Очевидно, на основе понятия атома можно определить графовую аналитическую структуру, такую, что если

- 1) атом имеет размерность меньше ширины машины,
- 2) атомы выполняются строго последовательно,

то гарантируется отсутствие взаимоблокировок.

Таким образом, можно представить графовую структуру данных, которая состояла бы из атомов. Такая структура данных позволяет ответить на вопрос, какие  $f$  упорядочивать, а для каких нужно гарантированно оставлять области для исполнения.

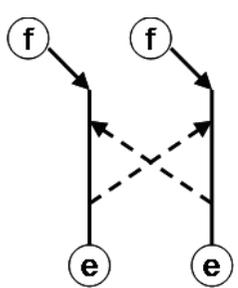


Рис. 1. Чисто статическая взаимоблокировка

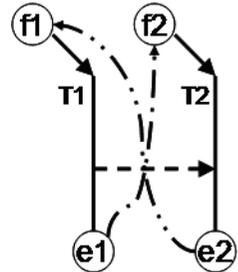


Рис. 2. Взаимоблокировка 2 вида, необходимость упорядочивания

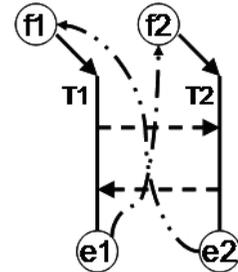


Рис. 3. Сущность совместного (неупорядочиваемого) исполнения или атом

### Литература

1. Obermarck R. Distributed deadlock detection algorithm // ACM Transactions on Database Systems (TODS). — 1982.
2. Elmagarmid A.K. A survey of distributed deadlock detection algorithms // ACM SIGMOD Record. — 1986.
3. Bernstein P.A., Goodman N. Concurrency Control in Distributed Database Systems // ACM Computing Surveys (CSUR). — 1981.
4. Timothy H.H., Smith J.E. Selective Dual Path Execution // Department of Electrical and Computer Engineering University of Wisconsin. — Madison. — 1996.

УДК 004.318

*А.В. Леченко*

Lechenko@frtk.ru

Московский физико-технический институт  
(государственный университет)  
ЗАО «Интел А/О»

### Использование архитектурного симулятора для тестирования формального описания цифровой логики микропроцессора

Существующие подходы к разработке функциональных тестов [1] подразумевают написание вручную системы тестирования из текстовых спецификаций. Данные методологии обладают существенными недостатками. Первый состоит в необходимости написания различных тестовых систем для разных микропроцессорных модулей, количество которых может достигать нескольких сотен. Второй заключается в необходимости разработки критически важных компонентов, например генераторов тестов, основываясь на текстовых спецификациях. Потенциальная неоднозначность описания, заключённого в спецификации, совместно с большим объёмом монотонной ручной работы, затрачиваемой на разработку тестовых систем, приводит к большой вероятности ошибок, недопустимых ввиду высокой стоимости их исправления в готовом продукте.

Использование архитектурного симулятора для тестирования формального описания цифровой логики микропроцессора может сократить влияние вышеприведённых факторов [2, 3] на процесс тестирования. Методология, основанная на данном подходе, реализует сквозной маршрут проектирования от исследования архитектуры до верификации, что способно на порядок уменьшить трудозатраты при отладке и увеличить скорость разработки новых микропроцессоров.

В докладе описывается единая тестовая система, в которой уже существующий архитектурный симулятор процессора выступает и в качестве генератора тестов, и в качестве эталонной модели для произвольного тестируемого аппаратного описания блока данного процессора.

### Литература

1. Губенко Я.С., Камкин А.С., Чупылко М.М. Сравнительный анализ современных технологий разработки тестов для моделей аппаратного обеспечения // Труды Института системного программирования РАН. — 2009. — Т. 17. — С. 133–143.

2. Kodakara S.V., Mathaikutty D.A., Dingankar A., Shukla S., Lilja D.J. The Model Based Test Generation for Microprocessor Architecture Validation // Proceedings of the 20th International Conference on VLSI Design held jointly with 6th International Conference: Embedded Systems. — 2007. — P. 465–462.

3. Mathaikutty D.A., Kodakara S.V., Dingankar A., Shukla S.K., Lilja D.J. MMV: A Metamodeling Based Microprocessor Validation Environment // IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems. — 2008. — V. 16, N. 4. — P. 339–352.

УДК 519.876.5

*Г.С. Речистов*

grigory.rechistov@intel.com

Московский физико-технический институт  
(государственный университет)  
ЗАО «Интел А/О»

### Методики измерения скорости эмуляции при использовании динамического двоичного транслятора

В настоящее время мы наблюдаем зарождение новой парадигмы использования вычислительной техники, которая характеризуется эксплуатацией виртуальных машин во всех сферах применения ЭВМ. Двоичная трансляция [1] является ключевой технологией построения таких эмуляторов, и критерием успешного её использования служит минимальное по сравнению с прямым исполнением замедление работы приложения под управлением виртуальной машины. В настоящее время существует множество программных решений, предоставляющих симуляцию процессоров архитектуры Intel IA-32 [2] и различаю-

щихся по использованным в них подходам и скоростью работы при различных сценариях использования [3, 4].

В данной работе определён набор шагов, необходимых для анализа производительности эмулятора, основанного на двоичном трансляторе.

1. Очерчен список подсистем типичного симулятора (рис. 1), влияющих на скорость моделирования.
2. Определён набор тестовых задач. Он должен включать как тесты в режиме приложения (когда эмулятор сам предоставляет минимальную функциональность операционной системы), загрузки BIOS, так и полной загрузки операционной системы с выполнением прикладной задачи под её управлением.
3. На основе анализа логики работы модулей составлен список параметров, определяющих их скоростные характеристики. Дальнейший анализ должен проводиться с использованием программ-профилировщиков [5, 6].
4. Особое внимание должно быть уделено методикам измерения скорости исполнения двоичного кода (соответствующий блок обведён жирной рамкой на рис. 2). Как правило, обычные средства анализа оказываются неприменимы, и приходится прибегать к инструментации генерируемого кода, что вносит искажения в показания.

На основе данной методики предполагается провести подробный анализ скорости симуляции различных расширений наборов инструкций, а также эмуляции особенностей архитектуры (вычисление регистра флагов, регистров состояния математического сопроцессора, поддержку защищённого режима, многозадачности и т.п.).

### Литература

1. Richard L. Sites [et al.]. Binary translation // Communications of the ACM. — 1993. — V. 36, N. 2. — P. 69–81.

2. Intel Corporation. Intel® 64 and IA-32 Architectures Software Developer's Manual.

3. Bellard F. Qemu, a fast and portable dynamic translator. — 2005.

4. Mihocka D. [et al.]. Virtualization without direct execution or jitting: Designing a portable virtual machine infrastructure // ISCA-35

Proceedings of the 1st Workshop on Architectural and Microarchitectural Support for Binary Translation.

5. Касперски К. Техника оптимизации программ. Эффективное использование памяти. — BHV, 2003.

6. Intel Corporation. Intel VTune Performance Analyzer 9.1 for Linux.

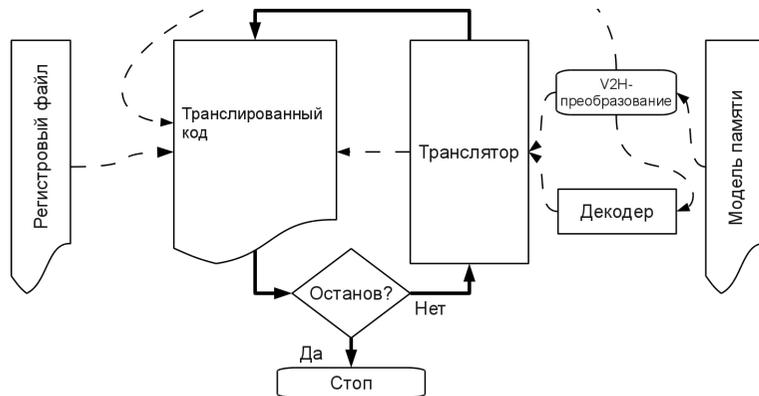


Рис. 1. Схема симулятора на основе двоичного транслятора

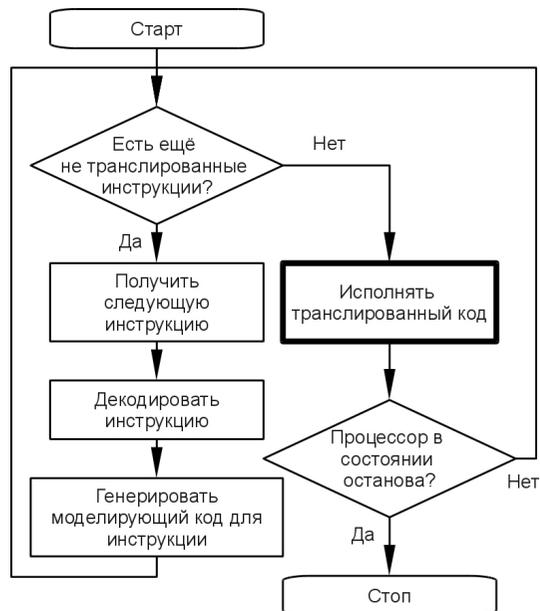


Рис. 2. Базовый алгоритм двоичной трансляции

УДК 004.4'422

Л.А. Румянцев

lev.rumyantsev@gmail.com

Московский физико-технический институт  
(государственный университет)  
ЗАО «Интел А/О»

## Использование постоянной и «вращающейся» регистровых баз для организации микропоточного исполнения

Среди работ, посвященных архитектурам с микропотоками [1], выделяются работы, затрагивающие технику планирования циклов, при которой итерация разделяется на части (стадии) для исполнения разными микропотоками — несвязанная программная конвейеризация (decoupled software pipelining). В этих работах для обмена данными между микропотоками используются специальные аппаратные механизмы — очереди или массивы регистров [2]. Во VLIW архитектурах известна техника использования вращающихся регистров для программной конвейеризации [3]. В данной работе исследуется модель взаимодействия микропотоков через вращающиеся регистры.

В архитектурах, использующих микропотоки, имеется массив регистров, к которым могут обращаться микропотоки. Назовём регистры, необходимые для одной итерации цикла во всех микропотоках, областью итерации. В технике несвязанной программной конвейеризации возможно асинхронное исполнение множества итераций. Поэтому для каждой из одновременно работающих итераций должна существовать своя область итерации. Чем больше таких областей, тем большее количество итераций может выполняться одновременно.

Для работы с регистрами из текущей области итерации у каждого микропотока имеется указатель на начало области итерации — база. Количество регистров в области итерации используется для инициализации баз микропотоков из одной стадии. Затем оно же используется инструкцией перехода по обратной дуге для сдвига текущей базы микропотока на следующую область итерации. При достижении последней области итерации база сдвигается в начало. Таким образом, микропотоки из разных стадий итерации могут обмениваться данными

ми, как показано на рис. 1. Эта схема вполне применима на практике, но она избыточно требовательна к количеству регистров.

Дело в том, что в одной области итерации находятся регистры как для обмена данными между микропотоками (глобальные), так и для использования внутри одного микропотока (локальные). Для увеличения параллельности работы цикла необходимо как можно больше экземпляров глобальных регистров. При этом локальные регистры приходится избыточно размножать в таком же количестве, как и глобальные.

В данной работе предлагается разделение массива регистров на несколько участков. Один из них используется для глобальных регистров. Остальные — для локальных. Каждый участок для локальных регистров соответствует одной стадии цикла. У микропотока вводится вторая постоянная база, указывающая на его локальные регистры, находящиеся внутри участка, соответствующего стадии микропотока. Локальные области итерации используются в количестве, равном количеству микропотоков. Глобальная область итерации размножается таким образом, чтобы занять все оставшиеся регистры. Таким образом, можно получить больше экземпляров глобальных регистров (рис. 2) и увеличить параллельность цикла.

В качестве исследования произведена оценка работы описанной архитектуры с одной вращающейся и с двумя базами. При реалистичной конфигурации регистрового файла 10% рассмотренных тестов показали потенциал прироста производительности до 20%, в среднем 2%. Результаты подтверждают положительный эффект от введения второй базы, которую можно рекомендовать к использованию для достижения большей степени параллельности при выполнении циклов.

### Литература

1. Kim H.-S., Smith J.E. An Instruction Set and Microarchitecture for Instruction Level Distributed Processing // In 29 th International Symposium on Computer Architecture (ISCA). — 2002. — P. 71–81.
2. Rangan R., Vachharajani N., Vachharajani M., August D. Decoupled software pipelining with the synchronization array // In Proc. of PACT-13. — 2004. — P. 177–188.
3. Dehnert J.C., Hsu P.Y.-T., Bratt J.P. Overlapped loop support in the Cydra 5 // Proceedings of the third international conference on Architectural support for programming languages and operating systems. — 1989. — P. 26–38.

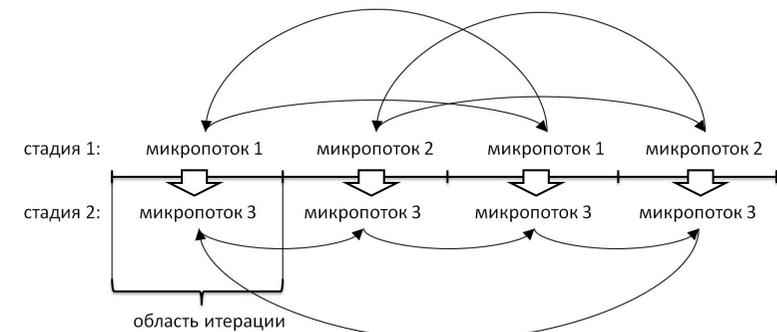


Рис. 1



Рис. 2

УДК 004.318

*Д.С. Устюгов*

dmitry.ustugov@intel.com

Московский физико-технический институт  
(государственный университет)  
ЗАО «Интел А/О»

### Высокопроизводительный инструкционный кэш для современной многопоточковой архитектуры

Эффективная работа инструкционного кэша (ИК) вносит значительный вклад в производительность всего микропроцессора. Одной из основных проблем построения архитектуры микропроцессора была и остается растущая разница между скоростями работы центрального процессора и памяти. На данный момент основным средством «борьбы» с этим было введение кэш-памяти. Структуре и различным оптимизациям кэш-памяти всегда уделялось большое внимание [1, 2].

Теоретический анализ «узких мест» подсистемы памяти команд позволил особенно выделить актуальность данной проблемы для многопоточковых архитектур. Параллельное исполнение многочисленных инструкционных потоков предъявляет особые требования к работе блока выборки команд. Одной из методик увеличения количества инструкций, исполняемых за 1 такт, является предвыборка строк в ИК. В литературе [3, 4, 5] описываются различные динамические и статические алгоритмы предвыборки. В данной работе рассматривается динамический алгоритм последовательной предвыборки.

Исследования проводились на примере одной из современных многопоточковых архитектур — архитектуры с векторным счетчиком команд (АВСК), с подобранными в ходе работы оптимальными характеристиками ИК. Согласно полученным результатам использование данного алгоритма предвыборки позволило значительно сократить количество «промахов» в ИК, а также увеличить скорость исполнения небольших тестов. Данный алгоритм предвыборки позволил практически полностью скомпенсировать время обработки «промахов» в ИК путем замещения приостановившихся инструкционных потоков, следующими за ними (т.н. неупорядоченное исполнение инструкционных потоков). В сравнении с традиционной суперскалярной архитектурой (ТСА), также использующей последовательный

алгоритм предвыборки строк в ИК, исследуемый алгоритм показал большую эффективность: количество «промахов» в ИК уменьшилось на 29% в АВСК против 10% в ТСА, и тем самым ускорив исполнение микротестов на 2,2 % в АВСК против 0,7 % в ТСА.

### Литература

1. *Smith A.J.* Cache Memories // ACM Computing Surveys. — 1982.
2. *Wilson K.M., Olukotun K.* High bandwidth on-chip cache design // IEEE Trans on computers. — 2001. — V. 50, N. 4.
3. *Hennessy J.L., Patterson D.A.* Computer architecture: a quantitative approach. — 2007.
4. *Falcon A., Ramirez A., Valero M.* Effective instruction prefetching via fetch prestaging // Proceedings of the 19th IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS'05). — 2005.
5. *Smith A.J.* Sequential program prefetching in memory hierarchies // IEEE, Computer. — 1978.

УДК 519.686

*Е.Е. Хатько*

evgeniy.khatko@gmail.com

Московский физико-технический институт  
(государственный университет)  
ООО «Даймонд Кволити»

### Один способ реализации алгоритма генерации тестов в тестировании на основе моделей

Для большинства приложений модели строятся на основе расширенных конечных автоматов [1]. Такой автомат представляет собой направленный граф с условными переходами. Узлы графа — это состояния автомата, а ветви графа — переходы между состояниями. Задача нахождения полного тестового набора сводится к задаче реализации алгоритма траверса графа, отвечающего следующим условиям:

- 1) окончание обхода при покрытии всех переходов (ветвей),
- 2) минимальный набор переходов,
- 3) соблюдение условий переходов.

Если убрать третье условие, то получаем задачу «Китайского почтальона» [2], для решения которой существует множество алгоритмов. Но для выполнения третьего условия необходимо использовать неинформированный алгоритм на графе, поскольку каждое условие в переходе динамически меняет граф, делая некоторые переходы недопустимыми. Автором был исследован и оптимизирован для данной задачи алгоритм A\* (A star) [3]. Функция стоимости  $F$  является основополагающей для работы алгоритма. Находясь в некотором узле графа, эта функция определяет, какой переход выбрать следующим. Выбирается тот переход, для которого значение  $F$  наименьшее. Изучив задачу о нахождении эйлерова пути на графе [4], предлагается ввести условия для выбора «следующей» ветви, находясь в «текущей»:

1) выбирается ветвь, которая ещё не покрыта (для всех ветвей вводится флаг  $unc\_edge$ , равный 0, — если ветвь непокрыта, и 1 — в противном случае);

2) выбирается ветвь, входящая в узел, который имеет наибольшее значение  $\delta = (out - in)$ , где  $out$  — количество исходящих ветвей,  $in$  — количество входящих ветвей в узел;

3) выбирается ветвь, условие которой «удаляет» наименьшее количество непокрытых ветвей ( $edges\_deleted\_by\_condition$ );

4) выбирается ветвь, условие которой делает недоступными наименьшее количество непокрытых ветвей (ветви становятся недоступными благодаря удалению других ветвей и 3 пункта) ( $edges\_unaccessible\_by\_condition$ );

5) Выбирается ветвь, ведущая в узел с наибольшим количеством непокрытых исходящих ветвей ( $unc\_out\_edges$ ).

Приоритет ветвей устанавливается при помощи специального масштабного коэффициента  $K = \max_{i \in Nodes} (in_i + out_i)$  по всем узлам, где  $in_i/out_i$  — количество входящих / исходящих ветвей для  $i$ -го узла. Таким образом,

$$F = unc\_edge \times K^3 - \delta \times K^2 + edges\_deleted\_by\_condition \times K + edges\_unaccessible\_by\_condition \times K - unc\_out\_edges.$$

Для оценки эффективности алгоритма применялась следующая методика: для каждого узла графа сравнивались значения посещения узла в результате работы алгоритма  $N(A^*)$  со значением максимума из исходящих и входящих ветвей узла  $N(EULER) = \max(in, out)$ .  $Eff = \{1 - \frac{N(A^*) - N(EULER)}{N(EULER)}\} \times 100\%$ .

Для оценки были выбраны два графа без тупиковых узлов: G1 — с большим количеством ветвлений и малым количеством узлов и G2 — приближенный к дереву (рис. 1.)

Были получены следующие результаты:

G1: [Start, 0.2.3.1.4.6.0.3.6.0.2.3.1.2.3.1.2.3.1.0.2.3.1.0.2.3.1.4.3] —  $Eff = 64\%$ ;

G2: [Start, 0.2.4.8.7.6.0.1.3.5.0.2.4.7.6.0.1.2.4.6] —  $Eff = 50\%$ .

## Литература

1. Computer Programming Software Terms, Glossary and Dictionary. [Электронный ресурс] — <http://www.networkdictionary.com/software>

2. Thimbleby H. The directed Chinese Postman Problem. — London: University College London Interaction Centre, 2003.

3. Decher R., Pearl J. Generalized Best-First Search Strategies and the Optimality of A\*. — Journal of the Association for Computing Machinery. — 1985. — V. 32, N. 3.

4. Edmonds J. Matching, Euler tours and the Chinese postman. — Canada: University of Waterloo, 2007.

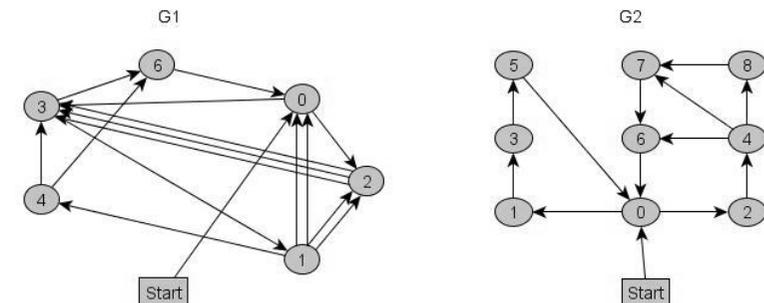


Рис. 1

Ю.А. Холопов<sup>1</sup>, Х.Ч. Нгуен<sup>2,1</sup>

hol\_it\_m@mail.ru, smallfire126@yahoo.com

<sup>1</sup> Институт точной механики и вычислительной техники  
им. С.А. Лебедева РАН

<sup>2</sup> Московский физико-технический институт  
(государственный университет)

### Тракт модуля ввода–вывода быстрого контура регулирования

Давайте рассмотрим структуру тракта ввода–вывода контура регулирования. В этой задаче аналоговая информация из объек среды (такая информация может быть получена с помощью датчиков, например: давления, температуры, кадров из видеоканалы...) с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП) преобразуется в цифровые сигналы, которые необходимо передать центральному процессору для обработки. Процессор обрабатывает данные, размещенные в памяти системы каналом ввода, результат обработки, также помещается в памяти. После обработки данные управления будут отправлены через канал вывода на исполнительное устройство, которое компенсирует влияние среды на объект управления. Очевидно, что между начальным моментом, когда информация из объек среды передается на центральный процессор и моментом выполнения реакции исполнительного устройства на объек среду, существует время задержки ( $T_{\text{зад}}$ ). Во многих задачах меньшее время задержки тракта ввода–вывода означает лучшее решение задачи регулирования. Одним из методов уменьшения времени задержки является применение интерфейса PCI Express для обмена информацией между центральным процессором и внешней объек средой. В своей работе пока мы пытаемся построить модуль быстрой передачи информации, который работает по интерфейсу PCI-Express (PCIe).

PCIe модуль — это модуль быстрой последовательной передачи, его скорость передачи достигает 2,5 Гбит/сек. Возможно использование нескольких последовательных каналов для обмена информацией между двумя устройствами (x1, x2, x4, x8, x12, x32...). Режим x1 состоит из одного ввода (input lane) и одного вывода (output lane).

Режим x2 состоит из двух вводов (input lane) и двух выводов (output lane).

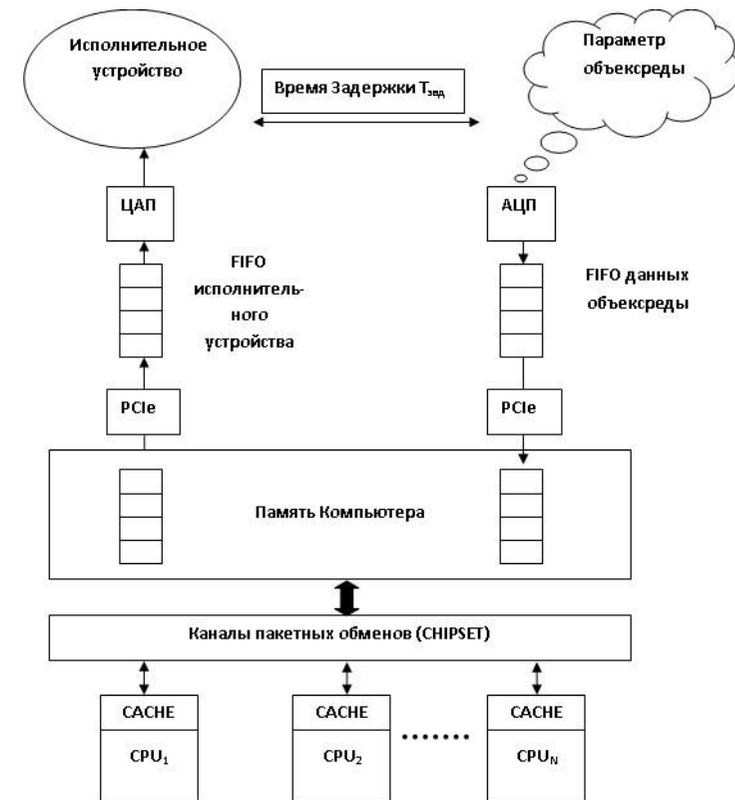


Рис. 1. Схема тракта ввода-вывода контура

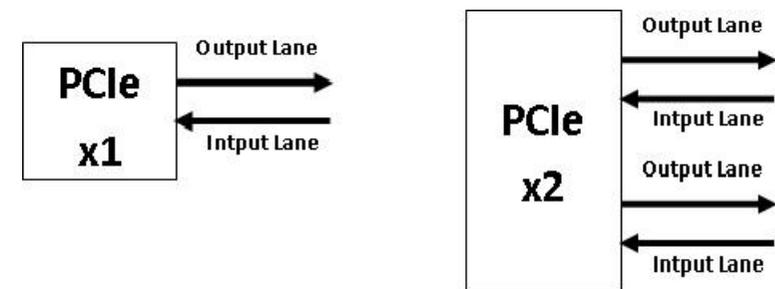


Рис. 2. PCIe x1 и x2

В задаче тракта ввода–вывода контура регулирования модуль PCIe передает данные из буфера данных объексреды на центральный процессор. С стороны центрального процессора другой модуль PCIe используется для получения потока данных из объексреды. Полученные данные сохраняются в буфере FIFO компьютера для обработки. Интерфейс PCIe также используется для обмена информации между центральным процессором и исполнительным устройством. Центральный процессор использует PCIe модуль для передачи данных после обработки на исполнительное устройство. С стороны исполнительного устройства другой PCIe модуль используется для получения данных из центрального процессора и хранит их в буфере FIFO исполнительного устройства (рис. 1, 2).

### Литература

1. Altera Corporation. Arria GX device handbook. V. 1. — San Jose California, 2009. — 242 P.
2. Altera Corporation. Arria GX device handbook. V. 2. — San Jose California, 2008. — 776 P.
3. Budruk R., Anderson D., Shanley T. PCI express system architecture. — Reading Massachusetts: Addison Wesley, 2003. — 1120 p.

УДК 004.414.2

*О.В. Шимко*

oleg.shimko@gmail.com

Московский физико-технический институт  
(государственный университет)  
ЗАО «Интел А/О»

### Система для анализа микроархитектурного критического пути исполнения программ в потактовой модели современного высокопроизводительного микропроцессора

Наиболее важной характеристикой процессора является его производительность. Ограничения современных микропроцессоров по площади кристалла и энергопотреблению приводят к появлению узких мест в архитектуре, а значит, к потерям производительности. Один из методов выявления потерь производительности — анализ микроархитектурного критического пути исполнения программ [1]. Общее время исполнения программы определяется длиной критического пути исполнения, поэтому устранение потерь на критическом пути позволяет увеличить производительность микропроцессора.

Цель работы — создание анализатора микроархитектурного критического пути (АМКП) исполнения программ в потактовой модели (имитационной модели) микропроцессора, который позволяет определить потери производительности и тем самым выявить наиболее «узкие» места (bottlenecks) архитектуры.

Потери производительности измеряются в тактах микропроцессора. При исполнении программы каждый такт можно рассматривать как потерю производительности по отношению к идеальной ситуации, когда программа выполняется мгновенно. Потери производительности происходят по определённым причинам. Их можно объединить в группы, такие как зависимости по управлению и по данным, длительность обращений в память, недостаточная пропускная способность блоков микропроцессора и другие. АМКП распределяет потери по типам (по причинам потерь) и по стадиям конвейера, на которых они происходят.

Для подсчёта потерь производительности на критическом пути используются токены. Токен представляет собой набор счётчиков, в

которые записываются потери. Он прикрепляется к инструкции, которая двигается по конвейеру, при этом происходит накопление потерь в соответствующих счётчиках токена. Распределение потерь на критическом пути получается путём передачи токенов между зависимыми инструкциями по правилу «последний пришедший» [1].

С использованием АМКП был проведён анализ потерь производительности высокопроизводительного микропроцессора с векторным счётчиком инструкций. Для анализа использовались эталонные тесты *bzip1* (сжатие данных) и *vpr* (размещение и трассировка цепей в ПЛИС) из набора SPEC CPU2000. Распределение потерь (performance breakdown) показано на рис. 1.

Из данных распределений можно сделать вывод, что почти 50% всех потерь составляют потери, обусловленные зависимостями по данным, около 20% — потери из-за ограниченных ресурсов микропроцессора, а 5% потерь вносят запросы в память. Вклад потерь, обусловленных запросами в память, незначителен, так как запуск тестов происходил на разогретых кэшах данных и инструкций первого уровня. Таким образом, наибольший вклад в задержки вносят зависимости по данным, несмотря на использование шин обратной передачи данных (data forwarding, bypassing).

В заключение отметим, что данный инструмент позволяет получать распределение потерь производительности на микроархитектурном критическом пути исполнения программы в потактовой модели любого современного микропроцессора. В этом и состоит главная практическая ценность работы. Также алгоритм, лежащий в основе АМКП, можно использовать для получения трассы критического пути, то есть определить, через какие стадии конвейера каких инструкций проходит критический путь.

### Литература

1. *Fields B., Rubin S., Bodic R.* Focusing Processor policies via critical-path prediction // In proceedings of the 28th annual international symposium on Computer architecture. — 2001.
2. *Luo Y., Rubio J., John L.K.* Benchmarking internet servers on superscalar machines // Computer. — 2003. — V. 36, N. 2.
3. *Eyerman S., Eeckout L., Karkhani T., Smith J.* A Performance Counter Architecture for Computing Accurate CPI Components // In proceedings of the 12th international conference on Architectural support for programming languages and operating systems. — 2006.

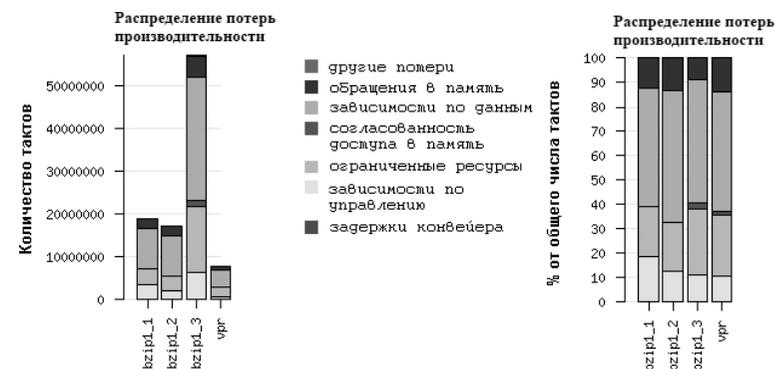


Рис. 1. Распределение потерь производительности на микроархитектурном критическом пути для эталонных тестов из набора SPEC CPU2000

## Секция проблем передачи и обработки информации

УДК 519.25

*М.Г. Беляев<sup>1</sup>, Е.В. Бурнаев<sup>1,2</sup>, П.В. Приходько<sup>1,2</sup>*

mikhail.belyaev@phystech.edu, burnaev@iitp.ru, prihodko@live.ru

<sup>1</sup> Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН

<sup>2</sup> Московский физико-технический институт  
(государственный университет)

### Методика построения аппроксимации многомерной функции на основе разложения по словарю параметрических функций

Под построением аппроксимации многомерной зависимости в работе понимается следующая задача. По заданной выборке данных  $\{\mathbf{X}_i, y_i\}_{i=1}^N$ ,  $\mathbf{X} \in R^n$ ,  $y \in R^1$ , которая порождена неизвестной функцией  $y = f(\mathbf{X})$ , необходимо построить функцию  $\hat{f}(\mathbf{X})$ , которая будет близка к  $f(\mathbf{X})$  в смысле некоторой нормы. Задача такого рода имеет важное прикладное значение, поскольку полученные модели предоставляют удобный инструмент для исследования зависимостей. В последнее время широкое распространение получили задачи суррогатного моделирования [1], которые предполагают замену вычислительно тяжелой модели, основанной на физике явления (например, кодов вычислительной гидродинамики), на ее аппроксимацию. Такой подход позволяет существенно сократить время проектирования сложного инженерного объекта.

Разработано большое разнообразие алгоритмов построения аппроксимирующей функции  $\hat{f}(\mathbf{X})$  по данным. Один из наиболее эффективных методов — это разложение по словарю параметрических функций [2]. В этом случае аппроксимация строится в виде  $\hat{f}(\mathbf{X}) = \sum_{j=1}^p \alpha_j \varphi_j(\mathbf{X}, \theta_j) + \alpha_0$ . Каждая из функций  $\varphi_j(\mathbf{X}, \theta_j)$  словаря зависит от набора параметров  $\theta_j$ , который оценивается по данным. Традиционно в качестве  $\varphi_j(\mathbf{X}, \theta_j)$  выбирают сигмоидальные [2] или

гауссовские [3] функции. В предлагаемом подходе словарь состоит из функций обоих видов, а его оптимальный объем вычисляется автоматически.

Для заданных параметров  $\theta_j$  базисных функций задача выбора коэффициентов  $\alpha_j$  разложения по словарю сводится к хорошо известной задаче линейной регрессии. Классический метод наименьших квадратов дает неустойчивую оценку коэффициентов при наличии мультиколлинеарности в матрице регрессоров. Для устранения этой проблемы используется гребневая регрессия, выбор параметра регуляризации осуществляется адаптивно и основан на степени вырожденности матрицы и оптимальной ошибки кросс-проверки [4].

Описанный подход к построению аппроксимации многомерной зависимости успешно выдержал сравнение с методами, реализованными в наиболее популярных инженерных приложениях, и продемонстрировал лучшие результаты на репрезентативном наборе как искусственных данных, так и данных из реальных инженерных задач.

### Литература

1. *Forrester A.* [et al.]. Engineering Design via Surrogate Modelling. A Practical Guide. — New York: Wiley, 2008. — 228 p.
2. *Burnaev E., Belyaev M., Prihodko P.* Approximation of multidimensional dependency based on an expansion in the parametric functions from dictionary // Proceedings of 9th International Conference «Computer Data Analysis and Modeling: Complex Stochastic Data and Systems». — 2010. — P. 4.
3. *Бурнаев Е.В., Беляев М.Г., Любин А.Д.* Аппроксимация многомерных зависимостей на основе разложения по словарю радиальных базисных функций // Труды 53-й научной конференции МФТИ. — 2010.
4. *Бурнаев Е.В., Беляев М.Г.* Адаптивная регуляризация в задаче аппроксимации многомерных зависимостей // Информационные технологии и системы (ИТиС'09): сборник трудов конференции. — 2009. — С. 431–435.

УДК 519.234.2

*Е.В. Бурнаев<sup>1,2</sup>, Ю.А. Янович<sup>2,1</sup>*

burnaev@iitp.ru, yanovich.yurij@yandex.ru

<sup>1</sup> Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН<sup>2</sup> Московский физико-технический институт  
(государственный университет)

## Построение гладких суррогатных моделей

В последние годы стали развиваться математические модели, основанные на данных — результатах натуральных и / или вычислительных экспериментов, проведенных с различными объектами рассматриваемого класса, с минимальным привлечением знаний из предметной области (физики процессов) [1]. Такие адаптивные модели иногда называют также метамоделями (модели над моделями) или суррогатными моделями (Surrogate Models). Основным методом построения суррогатных моделей является метод аппроксимации многомерных зависимостей по обучающей выборке конечного объема.

Построенная по конечной совокупности точек суррогатная модель может иметь малую ошибку аппроксимации, но при этом не иметь гладкий градиент. Отсутствие этого свойства существенно увеличивает шанс застревания в локальных экстремумах и делает суррогатную модель непригодной для расчета различного рода характеристик в процессе оптимизации сложного технического объекта. Таким образом, актуальна задача сглаживания суррогатных моделей.

Предполагая, что значения негладкой суррогатной модели являются случайным полем, неслучайной составляющей которого является искомая (достаточно хорошая) функция, можно получить гладкую оценку с помощью методов непараметрической регрессии [2], которые оценивают искомую функцию сверткой некоторой ядерной функции и значений негладкой суррогатной модели. Для подсчета такого рода оценки необходимо выбрать функцию ядра и его ширину, при этом ширину ядра можно задавать как универсальной для всех аргументов искомой функции (глобальное значение ядра), так и в виде функции от них (локальное значение ядра).

Для случая нормального распределения случайной составляющей поля известно теоретическое значение среднеквадратичного риска, равного отклонению непараметрической оценки от искомой функции для заданного значения входного вектора [2]. Кроме ширины ядра, в

выражение входят неизвестные значения дисперсии случайного поля и матрицы вторых производных искомой функции для заданного значения входного вектора. В качестве локальной ширины ядра используют ширину ядра, на которой достигается минимальное значение оценки среднеквадратического риска. В качестве глобальной ширины ядра используют ширину ядра, на которой достигается минимальное значение оценки интегрального среднеквадратического риска.

Другой способ вычисления глобальной оценки ширины ядра был предложен Боуманом и Аззолини [3]. Однако при таком подходе зачастую получаются излишне сглаженные оценки, что приводит к значительному росту ошибки аппроксимации.

Если выбрана функция и ширина ядра, то получение сглаженной оценки неизвестной функции сводится к нахождению многомерной свертки выбранного ядра и рассматриваемого негладкого аппроксиматора. В общем случае не удастся вычислить этот интеграл теоретически. Если в качестве функции ядра использовать многомерный аналог ядра Епанечникова и перейти к эллиптическим координатам, то задачу можно свести к эффективно вычисляемой — подсчету одномерного интеграла на отрезке.

На основе описанной теории разработаны эффективные численные алгоритмы сглаживания аппроксимации многомерной зависимости и подбора ширины используемой при сглаживании ядерной функции Епанечникова.

В докладе будет рассмотрена постановка задачи сглаживания суррогатной модели, описаны алгоритмы сглаживания и подбора ширины используемой при сглаживании ядерной функции Епанечникова, приведены результаты численных экспериментов, иллюстрирующих перспективность рассматриваемого подхода.

## Литература

1. *Kuleshov A.P., Bernstein A.V.* Cognitive technologies in adaptive models of complex plants // Keynote papers of 13<sup>th</sup> IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing (INCOM'09). — 2009. — P. 70–81.
2. *Wasserman L.* All of Nonparametric Statistics. — New York: Springer Science+Business Media, 2006. — 271 p.
3. *Bowman A., Azzolini A.* Applied Smoothing Techniques for Data Analysis. — Oxford: Clarendon Press, 1997. — 205 p.

УДК 519.651, 519.237.5

*Е.В. Бурнаев*<sup>1,2</sup>, *М.Е. Панов*<sup>2,1</sup>

burnaev@iitp.ru, panov.maxim@gmail.com

<sup>1</sup> Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН<sup>2</sup> Московский физико-технический институт  
(государственный университет)

## Об оценивании точности суррогатных моделей

Многие задачи инженерного проектирования требуют проведения экспериментов, целью которых является сравнение технических решений, полученных при различных параметрах эксперимента, и нахождение среди них оптимального решения. Выполнение одного подобного моделирования может занимать минуты, часы или даже дни. Таким образом, задача нахождения оптимального решения может оказаться невыполнимой, так как она требует многократного проведения моделирования.

Одним из способов решения данной проблемы является построение так называемых суррогатных адаптивных моделей [3]. По своей сути любая суррогатная модель является аппроксимацией  $Y = F_M(X)$  некоторой зависимости реального мира  $Y = F(X)$ . Причем функция  $F_M(X)$  обычно рассматривается в виде линейного разложения  $F_M(X) = \sum_{i=1}^p c_i \psi_i(x)$  по словарю базисных функций [2]. Для инженерных задач важно уметь делать не только прогноз неизвестного значения  $Y = F(X)$ , но и уметь предсказывать погрешность этого прогноза, поэтому важной задачей является задача построение функции  $\sigma(X)$ , оценивающей ошибку аппроксимации:

$$|F_M(X) - F(X)|.$$

Точность аппроксимационной модели зависит от количества и расположения точек в тренировочной выборке, наличия в ней шума, а также от структурных особенностей самой модели. Рассматривается модель наблюдений  $Y(X) = F_M(X) + \varepsilon(X)$ , где  $F_M(X) = \sum_{i=1}^p c_i \psi_i(x)$ , а  $\varepsilon(X)$  — коррелированный шум с некоторой, вообще говоря, неизвестной функцией корреляции  $R(X, X')$ . В этой модели наблюдений предполагается, что неизвестная зависимость  $Y = F(X)$  принадлежит классу функций, задаваемому разложениями по словарю базисных функций  $\{\psi_i(x)\}_{i=1}^p$ , или, по крайней мере, может быть хорошо приближена таким разложением (в таком случае шум моделирует невяз-

ку аппроксимации). Заметим, что функция  $F_M(X)$  линейна относительно регрессоров, задаваемых базисными функциями из словаря. Для линейных регрессионных моделей с коррелированным шумом существуют способы моделирования дисперсии предсказания [1]. Предлагается применить эти результаты и для нашей задачи, используя в качестве регрессоров базисные функции. Основной проблемой рассматриваемого подхода является необходимость производить оценку параметров шума, то есть осуществлять моделирование корреляционной функции и дисперсии. Для этого разработаны параметрические модели, оцениваемые на основе максимизации правдоподобия наблюдений. Предварительные результаты моделирования на реальных и искусственных данных показали перспективность предложенного подхода.

## Литература

1. Айвазян С.А. Основы эконометрики. — М.: Юнити-Дана, 2001. — 432 с.
2. Burnaev E.V., Belyaev M.G., Prihodko P.V. Approximation of multidimensional dependency based on an expansion in parametric functions from the dictionary // Proceedings of 9th International Conference Computer Data Analysis and Modeling: Complex Stochastic Data and Systems. — Minsk, 2010. — P. 4.
3. Kuleshov A.P., Bernstein A.V. Cognitive technologies in adaptive models of complex plants // Keynote papers of 13<sup>th</sup> IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing (INCOM'09). — Moscow, 2009. — P. 70–81.

УДК 519.2

*Е.В. Бурнаев<sup>1,2</sup>, М.Г. Беляев<sup>1</sup>, А.Д. Любин<sup>2,1</sup>*

burnaev@iitp.ru, mikhael.belyaev@phystech.edu, tsummubric@gmail.com

<sup>1</sup> Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН<sup>2</sup> Московский физико-технический институт  
(государственный университет)

### Аппроксимация многомерных зависимостей на основе разложения по словарю радиальных базисных функций

Аппроксиматор многомерной зависимости на основе разложения по словарю радиальных базисных функций имеет вид  $\hat{f}(x) = \sum_{i=1}^p \theta_i \cdot \psi_i(x)$ , где  $\psi_i(x) = e^{-\frac{\|x-c_i\|^2}{\sigma_i^2}}$  [1]. Задача построения такого аппроксиматора на некоторой обучающей выборке:  $S = \{x_i, f(x_i)\}_{i=1}^N$ , где  $x_i \in R^d$ ,  $f(x_i) \in R^1$  — значения аппроксимируемой функции  $f(x)$ , сводится к минимизации по неизвестным параметрам аппроксиматора некоторого функционала ошибки. Обычно в качестве функционала ошибки используют сумму квадратов отклонений [2]  $E = \sum_{x_i \in S} (f(x_i) - \hat{f}(x_i))^2$ . Таким образом, задача сводится к определению следующих параметров:

- количество радиальных базисных функций  $p$ ,
- положение центров базисных функций,
- значения ширины ядер базисных функций  $\sigma_i$ ,
- оптимальные значения весовых коэффициентов  $\theta_i$ .

В данной работе представлен алгоритм, эффективно решающий задачу определения указанных параметров. Разработанный алгоритм состоит из следующих шагов.

- Определение количества радиальных базисных функций и их начального положения. В качестве начальных положений радиальных базисных функций используются все точки  $\{x_i\}_{i=1}^N$  из выборки, выбор их подмножества размера  $p$  осуществляется на основе пошаговой лассо-регрессии с контролем ошибки на специально выделенном тестовом множестве. Значение ширины ядра

оценивается разбросом значений уже выбранных центров радиальных базисных функций на каждом шаге лассо-регрессии. Оптимальные значения весовых коэффициентов  $\theta_i$  определяются с помощью ридж-регрессии.

- Более тонкая итеративная подстройка положений центров и значений ширины ядер базисных функций. Подстройка параметров осуществляется на основе итеративного гибридного алгоритма с адаптивным выбором параметра регуляризации [3, 4].

Проведен ряд экспериментов по сравнению предложенного алгоритма с существующими алгоритмами аппроксимации (кригинг, искусственные нейронные сети, многомерная непараметрическая регрессия и т.д.). Результаты сравнения показали перспективность предложенного подхода.

### Литература

1. *Chen S., Cowan E.F.N.* Orthogonal least squares learning algorithm for radial basis function networks // IEEE Trans. Neural Networks. — 1991. — V. 2. — P. 302–309.
2. *Guillen A., Rojas I., Ros E., Pomares H.* Using fuzzy clustering technique for function approximation to approximate ECG signals // department of computer architecture and computer technology universidad de granada, Spain.
3. *Бурнаев Е.В., Беляев М.Г.* Адаптивная регуляризация в задаче аппроксимации многомерных зависимостей // Информационные технологии и системы (ИТиС'09): сборник трудов конференции. — М.: ИППИ РАН, 2009. — С. 431–435.
4. *Burnaev E.V., Belyaev M.G., Prihodko P.V.* Approximation of multidimensional dependency based on expansion in parametric functions from the dictionary // Proceedings of 9<sup>th</sup> International Conference Computer Data Analysis and Modeling Complex Stochastic Data and Systems. — Belarus, Minsk: 2010.

УДК 519.6

*Е.В. Бурнаев*<sup>1,2</sup>, *Е.Г. Гурьянов*<sup>2,1</sup>, *М.Г. Беляев*<sup>1,3</sup>

burnaev@iitp.ru, evgengur@yandex.ru, belyaevmichel@gmail.com

<sup>1</sup> Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН<sup>2</sup> Московский физико-технический институт

(государственный университет)

<sup>3</sup> Институт системного анализа РАН

### О детерминированном алгоритме перекрёстной проверки в задаче аппроксимации

В последние годы стали развиваться математические модели, основанные на данных — результатах натуральных и / или вычислительных экспериментов [2]. При построении таких моделей используются различные методы аппроксимации [1].

Перед началом обучения аппроксиматора всё множество данных случайным образом разделяется на два подмножества: обучающее и валидационное (проверочное) [1]. Подстройка параметров аппроксиматора осуществляется на обучающем множестве. Остановка обучения происходит на основе анализа поведения ошибки аппроксимации на валидационном множестве.

Приведем неформальную постановку решаемой задачи.

Имеется выборка  $S = \{x_i, y_i\}_{i=1}^N$ , точки которой являются реализацией некоторого, неизвестного нам распределения  $P(x, y)$ . Требуется найти такое разбиение данного множества на 2 непересекающихся подмножества  $S = S_{train} \cup S_{val}$ , что выполняются следующие два условия: 1)  $|S_{train}| : |S_{val}| \approx 3 : 1$ , где  $|S|$  — мощность множества  $S$ ; 2)  $P(x, y) \sim P(x, y|S) \sim P(x, y|S_{train}) \sim P(x, y|S_{val})$  эквивалентность распределений, где  $P(x, y|S)$  — оценка распределения  $P(x, y)$ , построенная по точкам множества  $S$ .

Основная идея алгоритма, предложенного для решения поставленной задачи, состоит в следующем. Сначала проводится стратификация выборки по  $y$  с учётом значений  $x$ . Затем внутри страт происходит разделение точек обучающей выборки согласно минимизации следующего критерия:

$$\min\{(1/N_1) \sum_{(x_i, x_j) \in S_1} (1/d(x_i, x_j)) - (1/N_2) \sum_{(x_i, x_j) \in S_2} (1/d(x_i, x_j))\},$$

где  $S_1$  — множество пар точек, принадлежащих к одному множеству (либо обе точки относятся к обучающему множеству, либо обе точки

относятся к проверочному множеству),  $S_2$  — множество пар точек принадлежащие к разным множествам,  $N_1$  — количество элементов множества  $S_1$ ,  $N_2$  — количество элементов множества  $S_2$ ,  $d(x_i, x_j)$  — расстояние между точками  $x_i$  и  $x_j$  по выбранной метрике. Проведенные вычислительные эксперименты показали перспективность разработанного алгоритма.

### Литература

1. *Burnaev E.V., Belyaev M.G., Prihodko P.V.* Approximation of multidimensional dependency based on an expansion in parametric functions from the dictionary // Proceedings of 9th International Conference Computer Data Analysis and Modeling: Complex Stochastic Data and Systems, September 7–11, Minsk, Belarus, 2010. — P. 4.

2. *Kuleshov A.P., Bernstein A.V.* Cognitive technologies in adaptive models of complex plants. Keynote papers of 13<sup>th</sup> IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing (INCOM'09), June 3–5, 2009, Moscow, Russia. — P. 70–81.

УДК 519.254

*Е.В. Бурнаев*<sup>1,2</sup>, *П.В. Приходько*<sup>2,1</sup>

burnaev@iitp.ru, prihodkop@live.ru

<sup>1</sup> Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН<sup>2</sup> Московский физико-технический институт

(государственный университет)

### Интеграция методов снижения размерности в процедуру построения аппроксимации многомерной зависимости

При решении задач аппроксимации часто оказывается полезным осуществить предварительное снижение размерности входных данных. Во многих методах восстановления зависимости число оптимизируемых параметров напрямую зависит от размерности входных данных, поэтому снижение размерности приводит также к уменьшению количества настраиваемых параметров метода, что позволяет упростить настройку параметров и, как правило, получить большую

точность итоговой модели. Однако необходимо учитывать и обратный эффект. Снижение размерности данных в общем случае приводит к потере некоторой информации, содержащейся в данных, и привнесению в них дополнительного шума. В докладе предлагается процедура, которая позволяет автоматически подбирать размерность сжатия данных с повышением точности, построенной по ним аппроксимирующей функции.

Для того чтобы подбирать размерность сжатия автоматически, необходимо задать некоторую метрику качества данной размерности. Так как в нашем случае снижение размерности является предварительным этапом при построении аппроксимирующей функции, то естественно в качестве такой метрики брать меру близости аппроксимирующей функции к исходной, например в смысле дискретной нормы  $L1$ . В этом случае процедура подбора оптимальной размерности сжатия сводится к перебору по всем размерностям и выбору той размерности, для которой аппроксимирующая функция получилась наиболее близка к исходной. Перебор можно существенно ускорить, если принять предположение о том, что функция зависимости ошибки от размерности выпукла вниз и имеет единственный минимум. Это предположение подтверждается экспериментами.

Методика, определенная выше, позволила нам провести сравнение основных методов снижения размерности. Из всех рассмотренных методов наилучшие результаты показал метод MAVE. Однако он имеет один существенный недостаток, а именно большие требования к памяти, что делает его не применимым для работы с большими выборками (примерно  $> 10k$  элементов).

Нами была предложена модификация метода, которая существенно уменьшила его требования к памяти и время работы. Метод MAVE находит отображение в пространство сниженной размерности (отображение задается матрицей  $B$ ) через решение задачи  $\min_{B, a_i, b_i, i=1..N} \left( \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N [y_j - \{a_i + b_i^T B^T (X_j - X_i)\}]^2 w_{ij} \right)$ , где  $(X_j, y_j)$  — входные данные,  $w_{ij}$  — веса точек (определяются методами непараметрической регрессии),  $a_i, b_i$  — коэффициенты локального линейного разложения неизвестной функции в окрестности  $X_i$ . Суть предложенной модификации сводится к тому, что вместо локального линейного разложения в каждой точке, можно изначально построить некоторую кусочно-линейную аппроксимацию функции (например, методом типа MARS) и свести задачу к задаче  $\min_{B, a_i, b_i, i=1..C} \left( \sum_{i=1}^C \sum_{j=1}^N [y_j - \{a_i + b_i^T B^T X_j\}]^2 w_{ij} \right)$ , где  $C$  — коли-

чество линейных участков (существенно, что  $C \ll N$ ). Эксперименты показывают, что предложенная модификация может существенно уменьшить время работы метода с незначительной потерей точности.

### Литература

1. *Li K.C.* Sliced inverse regression for dimension reduction. With discussion and a rejoinder by the author // J. Amer. Statist. Assoc. — 1991. — V. 86, N. 414. — P. 316–342.
2. *Xia Y., Tong H., Li W.K., Zhu L.X.* An adaptive estimation of dimension reduction space // J.R. Stat. Soc. Ser. B. Stat. Methodol. — 2002. — N. 3. — P. 363–410.
3. *Hristache M., Juditsky A., Polzehl J., Spokoiny V.* Structure adaptive approach for dimension reduction // Ann. Statist. — 2001. — V. 29, N. 6. — P. 1537–1566.

УДК 519.254

*Е.В. Бурнаев<sup>1,2</sup>, А.А. Маланов<sup>3</sup>*

*burnaev@iitp.ru, amalanov@gmail.com*

<sup>1</sup> Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН

<sup>2</sup> Московский физико-технический институт

(государственный университет)

<sup>3</sup> Институт системного анализа РАН

### Об автоматизации разведочного анализа источников данных

С развитием вычислительной техники появились вычислительные программы, моделирующие «физику процессов» сложными дифференциальными уравнениями в частных производных, позволяющие оценивать характеристики сложных технических объектов (различного рода CFD- и FEM-коды) в зависимости от значений параметров их компоновки и внешней среды. Численные методы решения таких уравнений имеют значительную вычислительную трудоемкость, что препятствует использованию такого рода программ в задачах, где необходимы массированные вычисления моделями на основе «физики процессов».

В последние годы стали развиваться математические модели, основанные на данных, или суррогатные модели (Surrogate Models) [1]. «Поставщиком» данных для обучения суррогатных моделей как раз и являются вычислительные программы, реализующие модели «физики процессов».

Зачастую реально используемые вычислительные программы могут иметь различные особенности (например, области больших градиентов и / или разрывов в области определения входных параметров программы), связанные как с физикой описываемых процессов, так и с особенностями реализации вычислительного метода. Для повышения точности суррогатной модели необходимо обнаруживать и учитывать указанные особенности, то есть проводить своего рода разведочный анализ. Таким образом, возникает задача построения методов и алгоритмов разведочного анализа вычислительных программ и их последующая автоматизация. Разведочный анализ вычислительной программы должен фактически состоять из двух компонент:

- «классической» компоненты, которая реализует разведочный анализ в классическом понимании [2] и направлена на выявление внутренних зависимостей, ранжировании входных параметров по важности относительно выходных переменных и т.п.;
- новой компоненты, направленной на обнаружение особенностей вычислительных программ и определение различных характеристик этих особенностей.

В докладе будут рассмотрены основные проблемы разведочного анализа вычислительных программ, предложены новые методы, направленные на обнаружение особенностей вычислительных программ, а также обсужден прототип программы, позволяющий автоматически проводить разведочный анализ. Использование прототипа помогло обнаружить разрывы в зависимости коэффициентов прочности стрингера пассажирского самолета от его геометрических параметров и приложенных сил. Идентификация разрывов в свою очередь позволила существенно повысить точность построенных суррогатных моделей.

Основным направлением будущей работы является дальнейшая алгоритмизация и автоматизация поиска точек разрывов и расширение функциональности программы разведочного анализа.

## Литература

1. *Kuleshov A.P., Bernstein A.V.* Cognitive technologies in adaptive models of complex plants // Keynote papers of 13<sup>th</sup> IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing (INCOM'09). — 2009. — P. 70–81.

2. *Айвазян С.А., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д.* Прикладная статистика. Основы моделирования и первичная обработка данных. — М.: Финансы и статистика, 1983. — 471 с.

УДК 519.254

*Е.В. Бурнаев<sup>1,2</sup>, П.Д. Ерофеев<sup>2,1</sup>*

*burnaev@iitp.ru, erofeev.paul@gmail.com*

<sup>1</sup> Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН

<sup>2</sup> Московский физико-технический институт  
(государственный университет)

## Методы инициализации нелинейных регрессионных моделей

Построение нелинейных регрессионных моделей связано с целым рядом нетривиальных задач [1]. Одна из них — инициализация параметров модели. Правильное решение этой проблемы является одной из важнейших предпосылок быстрой и эффективной сходимости к наилучшему результату последующего итеративного алгоритма [2].

В данной работе рассмотрена нелинейная регрессионная модель, состоящая из ансамбля аппроксиматоров, построенного специальным образом [3]. Каждый аппроксиматор структурно является разложением по словарю функций сигмоидного вида. Большинство алгоритмов инициализации такого рода моделей предполагает случайный выбор начальных весов из равномерного распределения в пределах некоторого диапазона [2, 5]. В данной работе предложен метод сферической инициализации весов, состоящий из двух этапов. Сначала генерируются углы из равномерного распределения, а потом модули векторов весов. Для углов также можно брать распределение с плотностью, пропорциональной изменению целевой переменной в разных направлениях. Однако, несмотря на доказанную эффективность подобного

подхода, он имеет существенный недостаток: две одинаковые модели, обученные на одних и тех же данных, могут значительно отличаться по качеству аппроксимации. Детерминированная инициализация параметров может решить эту проблему.

Предлагается два подхода к детерминированной инициализации весов. Первый предполагает предварительную аппроксимацию исходных данных кусочно-линейными сигмоидами [5] и последующую замену их непрерывными сигмоидами. После чего обучение происходит по стандартному алгоритму. Второй подход предполагает алгоритм, состоящий из двух шагов. Сначала в каждую точку исходной выборки ставится своя сигмоидная функция. А потом в процессе минимизации число этих функций сокращается, одновременно с подбором параметров модели.

Также детерминированными можно сделать основные используемые алгоритмы случайной инициализации, в том числе и алгоритм сферической инициализации. Этого можно добиться, используя заполняющие пространство дизайны [6].

В работе рассмотрены все предложенные и некоторые наиболее часто используемые алгоритмы случайной инициализации [2, 4]. Результаты проведенных численных экспериментов позволяют утверждать, что детерминистический подход к инициализации параметров оказывается достаточно эффективным и заслуживает дальнейшего исследования.

### Литература

1. *Bates D.M., Watts D.G.* Nonlinear regression analysis and its applications. — New York: Wiley, 1988. — 365 p.
2. *Thimm G., Fiesler E.* High Order and Multilayer Perceptron Initialization // Proceedings of the IEEE Transactions on Neural Networks. — 1994.
3. *Burnaev E. [et al.]*. Neural Approximation based on Regression and Boosting // Mathematical Methods in Reliability Theory Proceedings. — 2009.
4. *Fernández-Redondo M., Hernández-Espinos C.* Weight Initialization Methods for Multilayer Feedforward // ESANN'2001 proceedings. — 2001. — P. 119–124.
5. *Hush D. [et al.]*. Approximation with the Sweeping Hinge Algorithm // NIPS Proceedings. — 1997.

6. *Owen A.B.* Orthogonal arrays for computer experiments, integration, visualizations // Statistica Sinica. — 1998. — V. 2. — P. 439–452.

УДК 519.254

*Е.В. Бурнаев<sup>1,2</sup>, П.В. Приходько<sup>1</sup>*

*burnaev@iitp.ru, prihodkop@live.ru*

<sup>1</sup> Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН

<sup>2</sup> Московский физико-технический институт  
(государственный университет)

### Методология построения суррогатных моделей

В настоящее время построение суррогатных моделей (или мета-моделирование) широко используется при проектировании сложных технических объектов, особенно при оптимизации их конструкции. Мета-моделирование позволяет получать объекты с заданным уровнем надежности за существенно меньшее время по сравнению со временем, которое бы потребовалось для оптимизации конструкции объекта с применением современных систем автоматизации инженерных расчетов.

Такие модели строят на основе данных натуральных или вычислительных экспериментов с минимальным привлечением знаний из предметной области. Основная задача, которую необходимо решать при построении суррогатных моделей, — это задача аппроксимации неизвестной зависимости на основе ее значений на некоторой выборке точек. Оказывается возможным получить аппроксимацию исследуемой зависимости в виде явной аналитической функции, что позволяет эффективно проводить оптимизацию на полученной модели.

Математически задача построения мета-модели (суррогатной модели) сводится к построению некоторой зависимости  $\hat{y} = F_{surr}(\mathbf{X})$ ,  $\mathbf{X} \in D \subset \mathbb{R}^d$ , аппроксимирующей искомую зависимость  $y = F_M(\mathbf{X})$ ,  $\mathbf{X} \in D \subset \mathbb{R}^d$ ,  $y \in \mathbb{R}^1$ , для которой известна только выборка значений.

В методологии построения суррогатных моделей, приводимой в данной работе, предлагается строить суррогатную модель не из одной аппроксимирующей функции, а из нескольких аппроксиматоров

и классификатора. Использование такой схемы оказывается удобным по следующим причинам:

- рассматриваемая функция может иметь области с большой изменчивостью или разрывами. Выделение таких областей и построение на них локальных аппроксимаций позволяет существенно повысить точность модели;
- в конкретной задаче могут быть сформулированы разные требования к точности модели для разных областей. Например, может оказаться необходимым обеспечить высокую точность мета-модели только на участке  $A_\varepsilon = \{|F_M(\mathbf{X})| < \varepsilon, \mathbf{X} \in D \subset \mathbb{R}^d\}$ . Выполнения этого требования можно добиться, если построить отдельную модель только для точек из области  $A_\varepsilon$ .

Таким образом, после того как определены требования к точности мета-модели (определены области, где нужно обеспечить повышенную точность) и выделены области, где  $F_M(\mathbf{X})$  имеет простую структуру, а также области с большой изменчивостью или разрывами, необходимо построить классификатор, который будет определять, к какой из областей отнести новую точку, а также свою аппроксимирующую функцию для каждой области. Для построения аппроксимирующих функций и классификатора нами были разработаны специальные алгоритмы.

Предложенная методология была успешно применена при решении задачи аппроксимации ограничений в задаче оптимизации формы обшивки пассажирского самолета.

### Литература

1. *Burnaev E.V., Belyaev M.G., Prihodko P.V.* Approximation of multidimensional dependency based on an expansion parametric functions from the dictionary // Proceedings of CDAM'2010 conference. — 2010.
2. *Burnaev E.V., Grihon S.* Construction of the metamodels in support of stiffened panel optimization // Proceedings of the conference Mathematical Methods in Reliability. — 2009. — P. 124–128.

УДК 519.688

*О.А. Зверков, А.В. Селиверстов, В.А. Любецкий*

*zverkov@iitp.ru, slvstv@iitp.ru, lyubetsk@iitp.ru*

Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН

### Об одном алгоритме кластеризации белков

Предложен алгоритм кластеризации аминокислотных последовательностей белков, то есть слов различной длины в 20-буквенном алфавите, по их сходству. Алгоритм применён при исследовании пластов водорослей и споровиков. Пусть задано семейство видов  $\{S_i\}_{i=1\dots N}$ , в котором каждый вид представлен набором аминокислотных последовательностей его белков:  $S_i = \{P_{ij}\}_{j=1\dots M_i}$ . Алгоритм вычисляет меру сходства  $s_0(P_{ij}, P_{kl})$  для всех пар белков из всех видов семейства как наименьший штраф за выравнивание пары белков  $(P_{ij}, P_{kl})$  и соответствующую нормированную меру  $s(P_{ij}, P_{kl})$  по формуле  $2s_0(P_{ij}, P_{kl})(s_0(P_{ij}, P_{ij}) + s_0(P_{kl}, P_{kl}))^{-1}$ . Рассмотрим полный неориентированный граф  $G_0$  с множеством вершин  $\{P_{ij}\}$  и сопоставим каждому ребру  $e = \{P_{ij}, P_{kl}\}$  значение  $s(e) = s(P_{ij}, P_{kl})$ . Вместо полного графа можно использовать разреженный граф  $G$ , содержащий для каждого белка  $P_{ij}$  и каждого вида  $S_k$  ровно одно ребро  $e_l = \{P_{ij}, P_{kl}\}$  с максимальным значением величины  $s(e_l)$ , соответствующее ближайшему к  $P_{ij}$  в геноме  $S_k$  белку  $P_{kl}$ .

Алгоритм строит минимальный остовный лес  $F$  для графа  $G$ , используя в качестве веса ребра величину  $w(e) = -s(e)$ , то есть для каждой связной компоненты графа  $G$  строится покрывающее её дерево, такое, что сумма чисел, приписанных его рёбрам, максимальна. Для каждого дерева  $T \in F$  выполняется следующая рекурсивная процедура разделения: если  $T$  не удовлетворяет сформулированному ниже критерию останова, то из него удаляется наиболее слабое ребро, то есть ребро  $e_w$  с минимальным по дереву значением  $s(e_w)$ , а к каждому из двух полученных таким образом деревьев в свою очередь применяется процедура разделения. Критерий останова для данного дерева  $T = (V, E)$  следующий: (1)  $|V| < pN$ , где  $|V|$  — число вершин дерева  $T$ ,  $N$  — число всех видов семейства, а  $p$  — параметр алгоритма, выражающий максимально ожидаемую в исходных данных долю паралогов в кластерах (типично  $1 < p < 2$ ); (2)  $e_w = \{P_{ij}, P_{kl}\}$ ,  $i \neq k$ , то есть самое слабое ребро  $e_w$  соединяет два белка различных видов; (3) любая пара вершин  $\{P_{ij}, P_{il}\}$  дерева  $T$ , соответствующих белкам

из одного вида, соединена в дереве  $T$  путём, состоящим только из вершин, соответствующих белкам этого вида. Полученный в результате лес представляет разбиение белков на кластеры, состоящие из вершин одного дерева.

Пример биологического результата — предсказание нового кластера у споровиков *Piroplasmida*. Соответствующие гены *ups8* расположены между генами *gpl14* и *gps8*, кодирующими рибосомные белки. Функциональная принадлежность белка, кодируемого *ups8*, неизвестна. Корректность выделения нового кластера белков подтверждается анализом 5'-лидерных областей генов *ups8*, где найдены консервативные сайты. Действительно, естественно ожидать, что консервативный сайт служит для регуляции экспрессии генов, а однотипная регуляция свидетельствует об общем функциональном значении соответствующих белков. Сайты имеют консенсус 5'kATAGAm3' и расположены на расстоянии от 170 до 100 нуклеотидов от иницирующего кодона *ups8*. У *Babesia bovis* и *Babesia bigemina* они располагаются внутри кодирующей области гена *gpl14*. Однако в окрестности сайта в белке произошла вставка (состава TSYSIDDRNRFKD у *B. bovis*), отсутствующая у ортологичных белков L14. У *Theileria parva* сайт не перекрыт кодирующими областями.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Федерального агентства по образованию (Государственный контракт П2370).

УДК 681.327.12

В.В. Лихачев

vitaly.likhachev@phystech.edu

Московский физико-технический институт  
(государственный университет)

Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН

### Структурирование геоинформационных данных методами кластерного анализа

Одной из задач анализа геоинформационных данных является выделение в них однородных структур (кластеров). Широко применяемым методом кластеризации является Expectation–Maximization (EM) [1]. Обычно предполагается, что данные  $\vec{x}$  представляют собой смесь многомерных нормально распределенных случайных величин, а число кластеров  $k$  задается [2].

В работе рассматриваются некоторые модификации алгоритма EM, которые учитывают расположение кластеров в географическом пространстве. На M-шаге алгоритма вычисляются новые центры кластеров  $\vec{m}_i$  и их ковариационные матрицы  $S_i$ . Для элементов, входящих в кластер, определяется географический центр. На E-шаге вычисляются веса  $h_i^t$ , которые можно интерпретировать как вероятность принадлежности точки  $\vec{x}^t$   $i$ -тому кластеру:  $h_i^t \sim |S_i|^{-\frac{1}{2}} \exp \left[ -\frac{1}{2} (\vec{x}^t - \vec{m}_i)^T S_i^{-1} (\vec{x}^t - \vec{m}_i) \right]$ .

Можно предложить несколько вариантов учета географического расстояния: 1) географические координаты элементов кластера рассматриваются как дополнительный признак с некоторым коэффициентом  $\lambda$ :  $\tilde{h}_i^t \sim |S_i|^{-\frac{1}{2}} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left\{ \rho_f^2 + \lambda \frac{\rho_g^2}{\sigma_g^2} \right\} \right]$ , где  $\rho_f$  — расстояние в признаковом пространстве,  $\rho_g$  — в географическом пространстве,  $\sigma_g^2 = \sigma_x^2 + \sigma_y^2$ ,  $\tilde{h}_i^t$  — пересчитанное значение  $h_i^t$ ; 2) сравнение с пороговым расстоянием  $\rho_t$  до центра кластера  $\tilde{h}_i^t = \begin{cases} h_i^t, & \rho_g > \rho_t, \\ 0, & \rho_g < \rho_t. \end{cases}$ ; 3) пороговое расстояние вводится до точек, принадлежащих этому кластеру на предыдущей итерации, тогда  $\rho_t$  играет роль максимального расстояния между соседними точками в кластере.

Уменьшение влияния шума и предотвращение слияния значимых кластеров достигается выбором значения

$$h_t : \tilde{h}_i^t = \begin{cases} h_i^t, h_i^t \geq h_t, \\ 0, h_i^t < h_t. \end{cases}$$

Эксперименты показали, что модифицированный EM-алгоритм позволяет обнаружить кластеры компактные как в признаковом, так и в географическом пространстве, рис. 1.

### Литература

1. *Alpaydin E.* Introduction to Machine Learning. — Cambridge: The MIT Press, 2004. — 415 p.
2. *Айвазян С.А.* [и др.]. Прикладная статистика. — М.: Финансы и статистика, 1989. — С. 201–215.

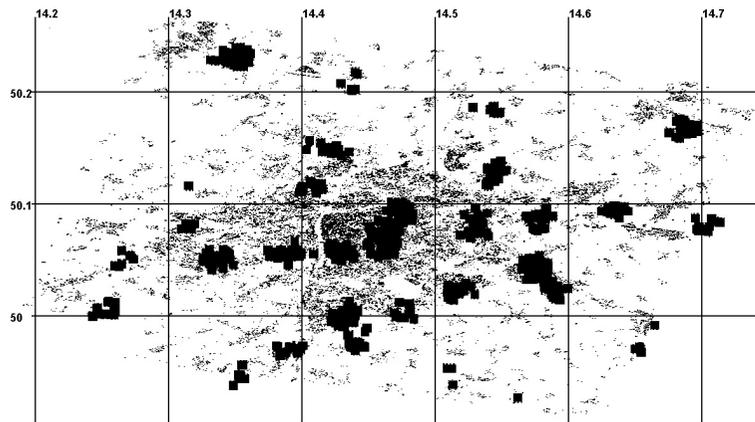


Рис. 1. Результат кластеризации данных интерферометрии РСА по г. Прага с параметрами  $k = 50$ ,  $h_t = 0,9$ ,  $\rho_t^2 = 0,0001\sigma_g^2$

УДК 519.688

*Н.О. Пересторонин, Д.А. Яроцкий*

pnost@macros-solutions.com, yarotsky@iitp.ru

Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН

### Тестирование алгоритмов многокритериальной оптимизации

Сравнение алгоритмов многокритериальной оптимизации представляет большой практический интерес, однако затрудняется многоплановостью характеристик оптимизаторов и, как следствие, сложностью обработки получаемого объема данных и представления результатов в удобной для анализа и выводов форме [1]. Разработанная и реализованная нами универсальная методика позволяет проводить разностороннее автоматическое тестирование и визуализировать как динамику эффективности оптимизаторов на отдельных задачах, так и совокупную сравнительную эффективность на классах задач.

Под эффективностью оптимизатора обычно понимается достигаемая им точность приближения множества парето-оптимумов при заданном числе итераций. Для характеристики этой точности в нашей работе предложен скалярный «функционал качества»  $Q$ , определяемый как расстояние Хаусдорфа между истинным парето-фронтom и множеством, доминируемым точками из истории оптимизации. Такая характеристика обладает всеми естественными свойствами; кроме того, она проста, универсальна и удобна для вычислений.

Сравнительная точность приближения парето-фронта может существенно зависеть от числа итераций, поэтому мы представляем динамику оптимизации в виде кривых, показывающих  $Q$  как функцию этого числа. Построение кривых проводится путем анализа истории оптимизации: на каждом шаге извлекается текущее приближение к парето-фронтom, и на нем вычисляется функционал качества. Такой анализ сопряжен с большим объемом вычислений, однако нами была осуществлена оптимизация алгоритма, которая позволила многократно ускорить его до практически приемлемого уровня.

Для характеристики совокупной эффективности оптимизаторов нами используется аналог подхода Долана–Морэ [2]: в каждом тесте оптимизаторы ранжируются по точности, и затем для каждого из них

строится функция доли задач, на которых его ранг имеет значение не хуже заданного.

Предложенная методика было применена к 47 одно- и многокритериальным тестовым задачам и 7 оптимизаторам разных типов, включающим как хорошо известные оптимизаторы, так и новый алгоритм MACROS GTOPT, разработанный сектором многокритериальной оптимизации ИППИ РАН. Результаты показали высокую информативность методики и позволили сделать целый ряд наблюдений и выводов о скорости сходимости и характерном поведении различных оптимизаторов, а также их сравнительной эффективности на разных классах задач.

### Литература

1. *Mor J., Wild S.* Benchmarking derivative-free optimization algorithms // *SIAM Journal on Optimization.* — 2009. — V. 20, N. 1. — P. 172–191.

2. *Dolan E., Mor J.* Benchmarking optimization software with performance profiles // *Mathematical Programming.* — 2002. — V. 91. — P. 201–213.

УДК 519.168

*А.В. Селиверстов, В.А. Любецкий*

slvstv@iitp.ru, lyubetsk@iitp.ru

Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН

### О функции Гильберта множества вершин куба

Работа посвящена описанию многочленов, равных нулю в каждой вершине  $n$ -мерного куба. Рассматривая суммы многочлена, определяющего исходную гиперповерхность, и некоторого многочлена, обращаемого в нуль в каждой вершине куба, можно деформировать исходную гиперповерхность так, чтобы она проходила через те же вершины куба, но позволяла применить известные методы оптимизации.

В частности, показано, что если некоторая вершина куба в  $n$ -мерном пространстве над произвольным полем не лежит на гиперповерхности степени  $d$ , то доля вершин, лежащих на этой гиперповерхности, не превосходит  $1 - 2^{-\min(d, n)}$ .

Рассмотрим формы, равные нулю в каждой вершине  $\pm 1$ -куба над полем, характеристика которого отлична от двух. Все формы степени  $d$  от  $n$  переменных образуют линейное пространство. Коразмерность подпространства форм, равных нулю в каждой вершине  $\pm 1$ -куба, является значением функции Гильберта  $h(d)$ . Описаны базисы пространств форм малой степени, равных нулю в каждой вершине  $\pm 1$ -куба. Определены формулы для значений функций Гильберта для малых аргументов:

$$h(1) = n,$$

$$h(2) = \frac{n^2 - n}{2} + 1,$$

$$h(3) = \frac{n^3 - 3n^2 + 8n}{6}.$$

Это позволяет вычислить значение функции Гильберта  $h(d)$  множества вершин  $\pm 1$ -куба размерности четыре или меньше при любом значении аргумента  $d$ .

Заметим, что  $\pm 1$ -куб лучше аппроксимируется гиперповерхностями чётной степени, чем нечётной. Напротив, квадратичные формы не могут обращаться в нуль в каждой вершине  $(0,1)$ -куба, но существуют кубические формы, равные нулю в каждой вершине  $(0,1)$ -куба.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Федерального агентства по образованию (Государственный контракт № П2370).

УДК 53.072

И.В. Симоненко<sup>1,2</sup>, К.А. Махнырь<sup>1,2,3</sup>, А.С. Усачев<sup>1,3</sup>

simonenko89@gmail.com, kmahnyr@gmail.com, asusachev@gmail.com

<sup>1</sup> Московский физико-технический институт  
(государственный университет)<sup>2</sup> Центральный экономико-математический институт РАН<sup>3</sup> ООО «Уличные лазеры»

### Быстродействующая лазерная видеокамера для видеосъемки сверхъярких объектов

Цель данной работы — создание быстродействующей видеокамеры, способной осуществлять видеосъемку процессов, сопровождающихся ярким свечением, которое затрудняет наблюдение и контроль.

Примером таких процессов может являться дуговая сварка труб нефте- и газопроводов, при которой для точности и хорошего качества сварки необходимо контролировать и регулировать скорость подачи электрода и ВАХ-процесса.

Для этой задачи был создан стенд, принципиальная схема которого представлена на рис. 1.

Монохроматический свет, исходящий из лазера, расширяется оптической системой. Далее располагается интерференционный фильтр, который не пропускает спектр излучения сварки и устраняет ее влияние на лазерный блок. Проходящий световой пучок детектирует объекты и процессы, происходящие внутри зоны наблюдения (в частности, сварочный катод и процесс отделения расплавленного металла). После этой зоны второй интерференционный фильтр обрезает часть спектра и лазерный пучок, через коллимирующую оптику попадает на фотоприемное устройство. Далее сигнал обрабатывается и в требуемом формате выводится на ПК.

Конечный вид устройства представлен на рис. 2. Оно представляет собой два отдельных блока, установленных на юстировочных столиках с тремя степенями свободы для удобной и быстрой настройки системы.

В качестве камеры используется цифровой матричный КМОП-сенсор с электронным затвором. То есть по сигналу от микропроцессора производится засветка матрицы в течение заранее запрограммированного времени, после чего сенсор выдает на цифровой выход

оцифрованные освещенности пикселей, последовательно начиная с левого верхнего угла до правого нижнего. По окончании передачи данных сенсор готов к засветке нового кадра. Поскольку размеры передаваемого кадра можно устанавливать меньше размера сенсора, то при размере  $100 \times 100$  пикселей время передачи составит минимум  $(100 \times 100)/(27 \text{ МГц}) \sim 0,37$  мс, где 27 МГц — максимальная частота передачи. Это время является основным ограничителем быстродействия камеры. Также для скоростной съемки важно, что сенсор имеет затвор типа «global shutter». Это означает, что при захвате каждого кадра производится обработка данных об освещенности со всей матрицы. Во многих видеокамерах в каждом кадре обрабатывается лишь часть матрицы, что может приводить к нежелательным эффектам.

Сенсор выдает сигналы строчной и кадровой синхронизации (в начале каждой строки и кадра).

Время передачи кадра в память микроконтроллера составляет  $(M \times N)/(27 \text{ МГц})$ , где  $M$  и  $N$  — размеры передаваемого кадра. Это основное время. Также некоторое время нужно на экспозицию и на реакцию микроконтроллера (выдача сигнала на захват следующего кадра). Итого минимум 0,4 мс/кадр (максимум 2500 кадров/с) при разрешении  $100 \times 100$  точек. Общее время съемки на эту величину не влияет, оно влияет на объем необходимого ОЗУ и на время перекачки «фильма» в компьютер.

Пример съемки процесса сварки представлен на рис. 3.

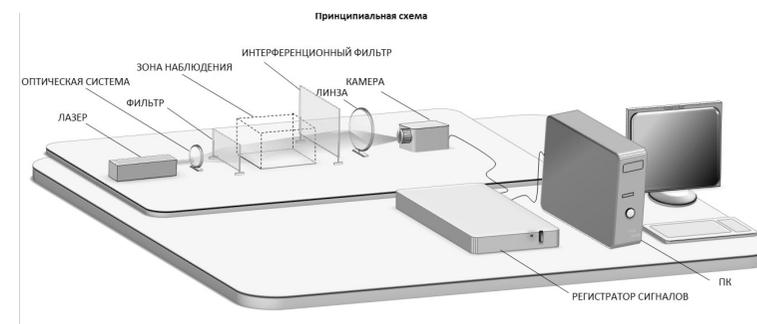


Рис. 1. Принципиальная схема стенда с использованием лазерной камеры

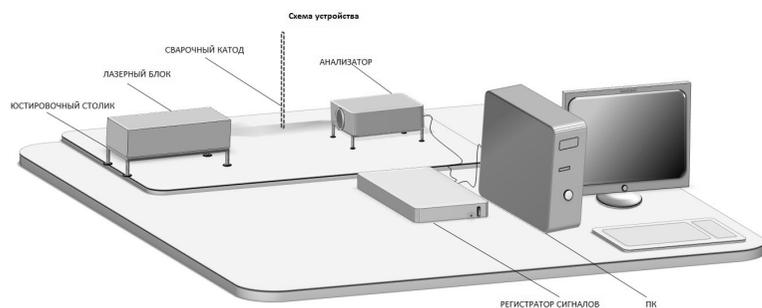


Рис. 2. Схема устройства лазерной видеокамеры для обработки сварочных процессов

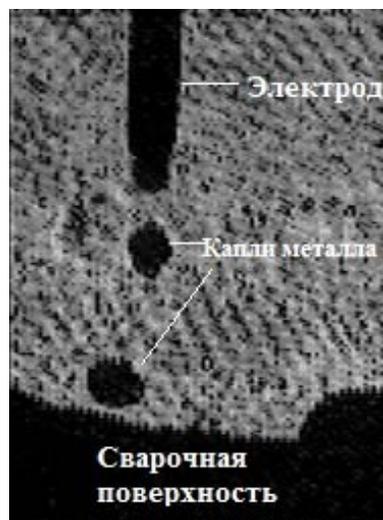


Рис. 3. Изображение сварочного электрода, полученное в процессе сварки

### Литература

1. Раби Ж.М., Чандракасан А., Николч Б. Цифровые интегральные схемы. Методология. — М.: И. Д. «Вильямс», 2007. — 912 с.
2. Точчи Р., Уидмер Дж., Нил С. Цифровые системы. Теория и практика. — М.: И. Д. «Вильямс», 2004. — 1024 с.

## Секция радио и информационных технологий

УДК 621.396.2

*А.В. Бабинцев*

leha@frtk.ru

Московский физико-технический институт  
(государственный университет)

Научно-исследовательский институт радио

### Оценка отношения сигнал–интерференция в сотовых геостационарных спутниковых системах связи с многократным использованием полос частот

В настоящее время в геостационарной спутниковой связи существует ряд кризисных явлений, обусловленных нехваткой свободного частотно-орбитального ресурса. Только при органическом сочетании средств преодоления этих явлений с экономичностью многолучевого космического сегмента можно обеспечить коммерческую привлекательность и действительно массовый характер использования спутниковой связи, создавая для этого так называемые сотовые геостационарные системы ФСС (СГС-ФСС), которые специализированы для применения в гибридной NGN — инфраструктуре сетевого доступа.

Одной из важнейших задач при разворачивании подобных систем является оценка пропускной способности каналов связи. При этом к самой сложной части данной задачи относится оценка отношения сигнал–интерференция.

Как и в сотовой связи, область покрытия спутникового сигнала может быть разделена на множество небольших зон с помощью многолучевой антенны. При этом лучи, имеющие одинаковую полосу частот, интерферируют между собой (рис. 1). Спутниковая земная станция, находящаяся в зоне покрытия одного из лучей, может обмениваться информацией с абонентским терминалом, находящимся

в зоне покрытия другого луча. Для сотовой спутниковой связи могут быть применены такие известные технологии беспроводной связи, как CDMA, FDMA, TDMA, многократное использование полос частот, ортогональная поляризация сигнала. Также в описываемой системе может быть реализована относительно новая технология адаптивного кодирования и модуляции (АКМ).

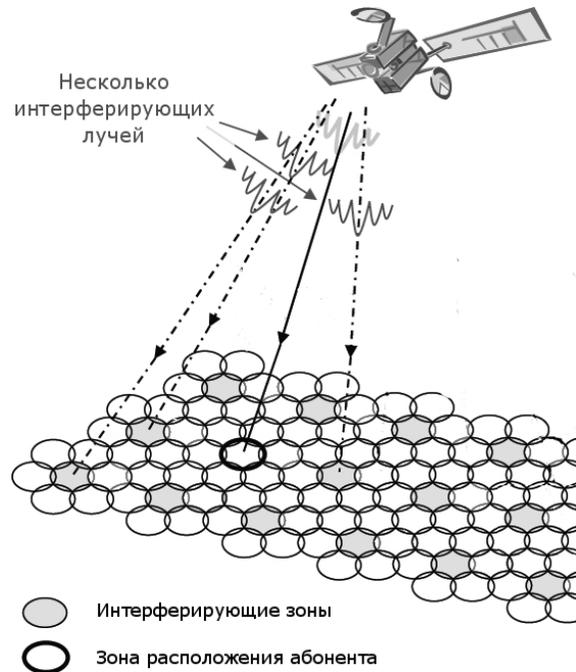


Рис. 1. Интерференция между лучами

К трем основным параметрам системы сотовой спутниковой связи относятся:

1. Разнос лучей (определяется как спад диаграммы направленности антенны, выраженный в дБ, в точке пересечения лучей антенны).

2. Коэффициент многократного использования частот, определяемый как количество полос частот, на которое разделена выделенная полоса частот.

3. «Стандартизированное» отношение сигнал-шум, определяемое как отношение сигнал-шум, испытываемое абонентским терминалом в центре зоны покрытия луча. При этом предполагается, что используется одна полоса частот.

4. На рис. 2 и 3 представлены расчеты минимальной пропускной способности для системы без АКМ и средней пропускной способности для системы с АКМ соответственно при различных параметрах, где  $L$  — коэффициент многократного использования частот,  $E_s/N$  — «стандартизированное» отношение сигнал-шум.

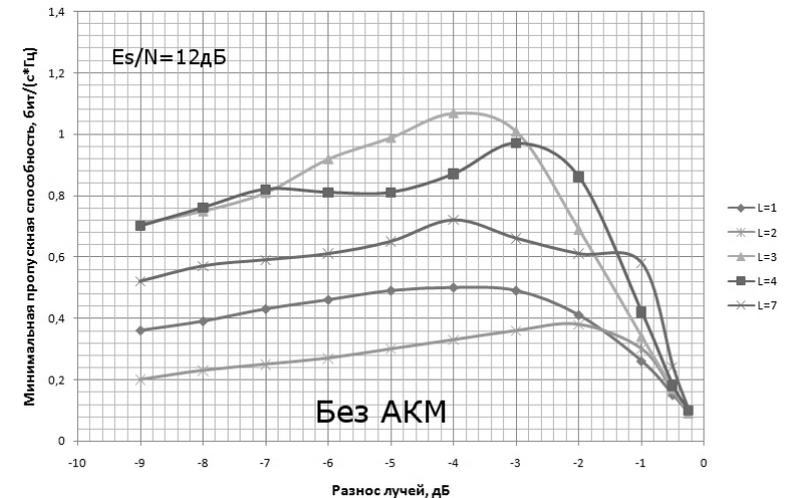


Рис. 2. Минимальная пропускная способность для системы без АКМ

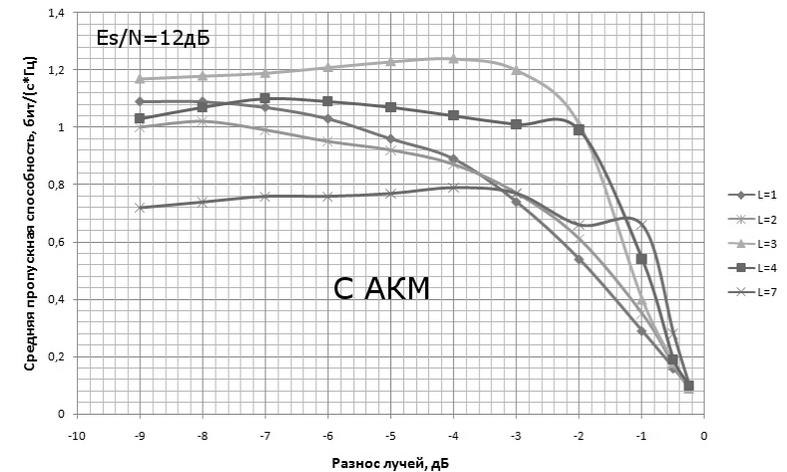


Рис. 3. Средняя пропускная способность для системы с АКМ

### Литература

1. *Miller M.J.* Capacity maximization for a unicast spot beam satellite system. International Publication Number WO2009/015093 A1. — 2009. — 62 p.
2. *Chhabra S.* An analytical tool for calculating co-channel interference in satellite links that utilize frequency reuse. Master's thesis. — 2006. — 106 p.

УДК 621.391.82

*Д.И. Бегунов*

begunov4@yandex.ru

Московский физико-технический институт  
(государственный университет)

### Способ оптимизации хранения и использования информации в базах данных

В последние десятилетия наблюдается стремительный рост объемов информации, используемых в различных областях человеческой деятельности. Связано это в первую очередь с развитием технических средств создания информации и открывшейся возможностью перехода на цифровой способ хранения данных. Однако даже в самых современных компьютеризированных хранилищах неизбежно возникает проблема, заключающаяся в трудности хранения большого количества информации и невозможности её быстрого и эффективно использования из-за чрезвычайно быстрых темпов роста объемов данных. В настоящее время эти факты всё чаще и чаще находят своё отражение в литературе, например в [1].

Кроме того, ввиду существования непрерывного процесса актуализации информации возникает задача по определению того содержания, которое необходимо сохранять. То есть уже когда-то созданная ранее информация должна быть проанализирована на предмет своей востребованности и определения ценности для хранения.

Одним из предлагаемых способов, с помощью которого можно попытаться решить эти задачи, является создание своеобразной уникальной библиотеки типовых информационных процессов (ИПт) в

информационно-управленческих сетях передачи данных (ИУС), определение которых приведено в статьях [2, 3]. Она будет играть роль своеобразного «базиса» для всех информационных процессов, к которому уже будут добавляться атрибуты, соответствующие каждому конкретному воплощению, что в итоге позволит существенно сократить избыточность баз данных. То есть предлагаемый подход заключается в том, чтобы хранение информации рассматривать как хранение типовых информационных процессов, которые будут автоматическим образом определяться (выделяться из массива данных) с помощью разрабатываемых технических средств.

Таким образом, разработка новых эффективных методов обработки и хранения информации является важной и актуальной задачей, решение которой позволит сократить избыточность баз данных, оптимизировать способы поиска и извлечения информации, а также существенно повысит пороговый предел наполнения хранилищ информации.

### Литература

1. *Журавлёва Е.Ю.* Научно-исследовательская инфраструктура Интернет // Вопросы философии. — 2010. — № 8. — С. 155–166.
2. *Сарьян В.К.* Новый способ структуризации сетей передачи данных // Труды НИИР. — 2001.
3. *Сарьян В.К.* Кинетика сетей передачи данных. Постановка проблемы // Труды НИИР. — 2003. — № 10.

УДК 621.376

*М.А. Карпова*

m.a.karpova@inbox.ru

Московский физико-технический институт  
(государственный университет)

Научно-исследовательский институт радио

**Расчет потерь в цифровом спутниковом канале  
передачи данных при линейных искажениях  
на борту космического аппарата**

В работе рассматривается способ расчета потерь в цифровом спутниковом канале передачи данных при наличии в нем линейных искажений. Эти искажения возникают при фильтрации сигнала на борту КА и приводят к межсимвольной интерференции [1]. На рис. 1 представлено сигнальное созвездие квадратурной фазовой манипуляции при таких искажениях.

Из рисунка видно, что каждая из точек созвездия расщепляется еще на 4 согласно количеству точек в исходном созвездии. Основываясь на этих особенностях, можно вывести аналитическую зависимость вероятности битовой ошибки от отношения средней энергии на бит к спектральной плотности мощности шума в канале с аддитивным белым гауссовским шумом. Ошибка возникает, когда координаты принятого символа выходят за пределы области декодирования, соответствующей переданному символу. Считая все 16 точек искаженного созвездия равновероятными, можно получить зависимость вероятности ошибки на бит от отношения средней энергии на бит к спектральной плотности мощности шума при различных величинах искажений. График этой зависимости приведен на рис. 2.

Для расчета потерь сначала нужно выбрать требуемую вероятность ошибки. Для нее сравниваются значения сигнал / шум в канале с искажениями и в канале без них. Разность этих значений равна вносимым потерям. Из рис. 2 видно, что величина потерь от линейных искажений возрастает с уменьшением вероятности ошибки.

Стоит отметить, что все рассуждения проводились для демодулятора с жестким решением. В цифровых радиоканалах применяется помехоустойчивое кодирование, которое обеспечивает передачу сообщений практически без ошибок при достижении определенного

значения сигнал / шум. Для каналов с кодированием характерно резкое уменьшение вероятности ошибки на бит при достижении определенного порогового значения (обычно это значение составляет  $10^{-2}$ – $10^{-3}$ ). Поэтому потери могут быть вычислены для канала без кодирования для той вероятности ошибки, при которой начинается ее резкое уменьшение в канале с кодированием. Вычисленные значения потерь соответствуют потерям для канала с кодированием, так как на участках лавинообразного снижения вероятности ошибки кривые для различных линейных искажений практически параллельны друг другу [1].

**Литература**

1. Карпова М.А., Шлишкин А.Л. Линейные искажения в цифровом спутниковом канале передачи данных // Труды НИИР. — 2010. — № 2. — С. 49–55.

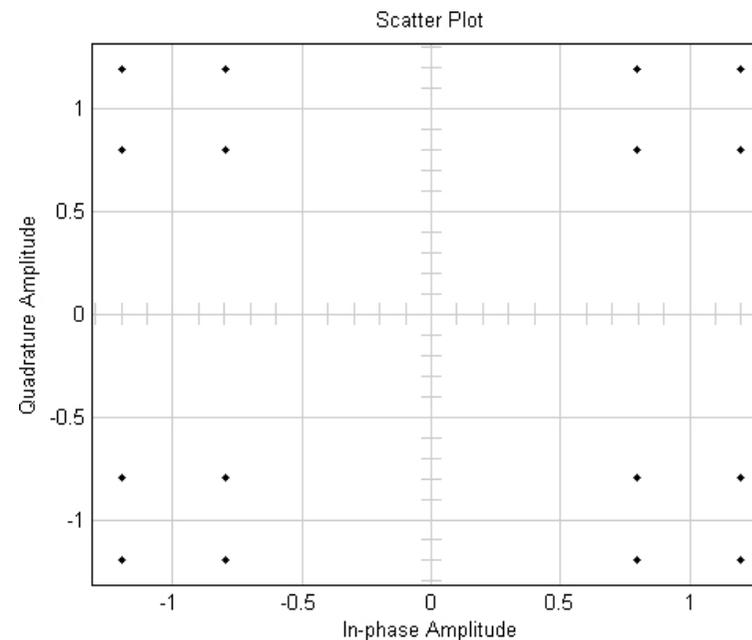


Рис. 1. Сигнальное созвездие в канале с линейными искажениями

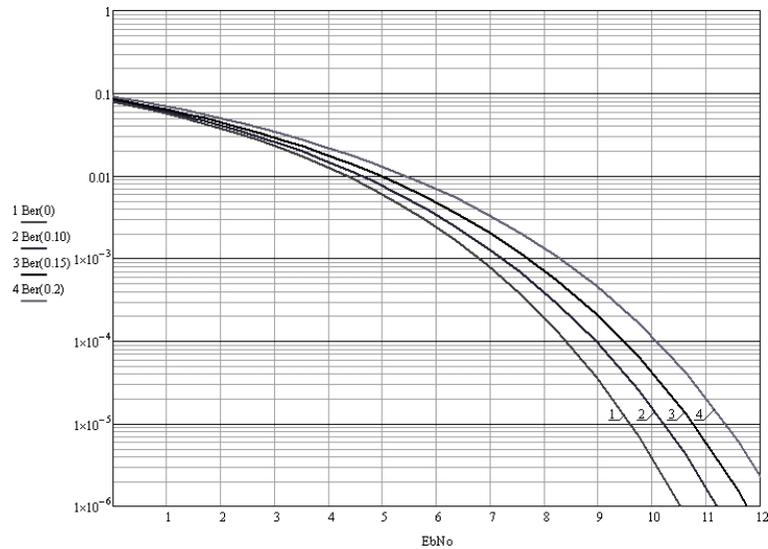


Рис. 2. Зависимость вероятности ошибки на бит к значениям сигнал / шум

УДК 004

*А.С. Лутохин<sup>1,2</sup>, Н.А. Сущенко<sup>1,2</sup>*  
 lutokhin.alexander@yandex.ru, sckol@ya.ru

<sup>1</sup> Московский физико-технический институт  
 (государственный университет)

<sup>2</sup> Научно-исследовательский институт радио

### Система индивидуального оповещения абонентов о чрезвычайных ситуациях

В докладе описываются система индивидуального оповещения абонентов о чрезвычайных ситуациях и принцип функционирования этой системы. Отличительной особенностью данной системы является возможность индивидуализации действий системы для каждого из абонентов путём занесения индивидуальных психофизических параметров абонентов в их мобильные терминалы, в роли которых могут

выступать современные сотовые телефоны. Кроме того, система обладает возможностью передачи на терминалы абонентов аудиовизуальных сообщений, содержащих список рекомендуемых действий и мер, направленных на минимизацию ущерба от чрезвычайных ситуаций ещё до наступления нелинейной стадии развития чрезвычайной ситуации, что обеспечивается применением высокочувствительных датчиков чрезвычайных ситуаций наравне с приоритетным выводом из ЧС тех абонентов, индивидуальные особенности которых приводят к наибольшему риску при условиях данной ЧС. Все эти особенности позволяют эвакуировать абонентов системы из зоны чрезвычайной ситуации с минимальным риском для их жизни.

Работа системы прошла опытную проверку в Останкинской телевизионной башне. При этом был применен ряд оригинальных технических решений: определения местоположения абонента путем его периодического опроса по технологии Bluetooth, определение оптимального пути выхода из ЧС методом байесовских сетей, передача программы принятия решений, связанной с конкретным помещением и включающей в себя различные характеристики помещения и существующих в нём угрозах заблаговременно, то есть во время нахождения абонента в помещении до наступления ЧС.

### Литература

1. Назаренко А.П., Сарьян В.К. Использование массовых информационно-управленческих сетей (МИУС) для расширения когнитивных возможностей существования человека в техногенной среде // 4-я отраслевая научная конференция-форум «Технологии информационного общества». — М., 2010.

УДК 004

*А.П. Назаренко, В.К. Сарьян*

apn@niir.ru, sarian@niir.ru

Научно-исследовательский институт радио

### **Теория инфокоммуникационного взаимодействия человеко-машинных объектов и окружающей среды в условиях возникновения чрезвычайных ситуаций техногенного характера**

Современный человек, особенно в мегаполисах, живет преимущественно в искусственной техногенной среде. В обычных условиях эта среда ему в основном знакома. В терминах разрабатываемой теории это означает, что индивидуальная семантическая аномалия (СА) рассматриваемого человеко-машинного объекта имеет пересечения с семантическими аномалиями окружающих предметов и его взаимодействие сводится к синтезу «свойственного» и он путем воспроизведения типовых информационных процессов обеспечивает свое относительное безопасное существование. При возникновении любой чрезвычайной ситуации (ЧС) техногенного характера все предметы локальной области, (например, здания), окружающей среды приобретают новые для подавляющего большинства объектов свойства, а СА этих предметов переходит для данного объекта из разряда «свойственной» в разряд «несвойственной». Расхождение СА становится еще более ощутимой, так как в силу индивидуальных психофизических данных человека (как части человеко-машинного объекта) и особенностей построения его машинной составляющей, СА этого объекта может остро изменить свои значения в результате возникновения и особенностей эволюции того же ЧС.

Человеко-машинный объект, оказавшийся в локальной среде в условиях ЧС, то есть в условиях возникшей и постоянно меняющейся неопределенности, может принять неправильное (неоптимальное) управленческое решение (так как не будет возможности воспроизвести даже хорошо известный ему типовой процесс) и в результате пострадать.

Есть две возможности снизить негативные последствия возникновения ЧС техногенного характера:

1) «растянуть» время принятия индивидом решения, то есть «увеличить» значимый для объекта промежуток времени между начальной и катастрофической стадиями ЧС путем фиксации самой ранней и промежуточных стадий, относящихся к линейному участку временного развития ЧС, и своевременно информировать об этом объект;

2) уменьшить до минимума с помощью инфокоммуникационных технологий неопределенность ситуации индивидуально для каждого объекта и окружающей его данной локальной среды переводом «несвойственной» информации в разряд «свойственной» и тем самым обеспечить объекту воспроизводства необходимого типового процесса в заданном отрезке времени.

Используя развиваемую теорию инфокоммуникационного взаимодействия человеко-машинных объектов и окружающей техногенной среды, удалось найти новые решения, позволяющие на практике обеспечить существенное повышение показателей индивидуальной безопасности массовых человеко-машинных объектов при возникновении ЧС. Эти решения были запатентованы.

#### **Литература**

1. Назаренко А.П., Сарьян В.К. Использование массовых информационно-управленческих сетей (МИУС) для расширения когнитивных возможностей существования человека в техногенной среде // 4-я отраслевая научная конференция-форум «Технологии информационного общества». — М., 2010.

УДК 621.397.4

*А.Е. Отачкин*

morreh89@yandex.ru

Московский физико-технический институт  
(государственный университет)

Научно-исследовательский институт радио

**Структурная схема скремблера системы условного доступа «Роскрипт»**

В системах условного доступа скремблером называют устройство, главной функцией которого является шифрование телевизионного потока, за счёт которого доступ к предоставляемым услугам могут получить только пользователи, обладающие соответствующими правами.

Разрабатываемый IP-скремблер должен быть способен выделять необходимые для шифрования данные из общего потока, производить скремблирование в соответствии с отечественным алгоритмом шифрования ГОСТ 28147-89, а также уметь вносить изменения в некоторые другие части потока.

Скремблер должен быть способен в реальном масштабе времени обрабатывать большие объёмы информации и выдавать их в сеть без существенных задержек.

Помимо шифрования принимаемых данных, которое является основной функцией устройства, в нём должна присутствовать система управления. Эта система необходима для осуществления настройки шифрующего блока, выбора каналов, доступ к которым нужно ограничить, и для других задач, обеспечивающих правильную работу системы.

На рис. 1 изображена общая схема устройства без конкретных деталей, а на рис. 2 — более подробная схема. Главным её элементом должен стать блок, функцией которого является шифрование потока данных. Этот блок планируется реализовать на микросхеме типа ПЛИС. В связи с необходимостью обрабатывать большие объёмы информации используются промежуточные микросхемы, преобразующие поступающий на вход устройства Ethernet-поток в надлежащий формат. Данные, сопровождающиеся тактовыми и контрольными сигналами, поступают напрямую на входы ПЛИС, на котором реализована подпрограмма преобразования IP-потока в последователь-

тельность MPEG-пакетов, и после шифрования — в обратную сторону. Структура блока инкапсуляции данных в MPEG изображена на рис. 3. Внешний вид устройства схематично показан на рис. 4.

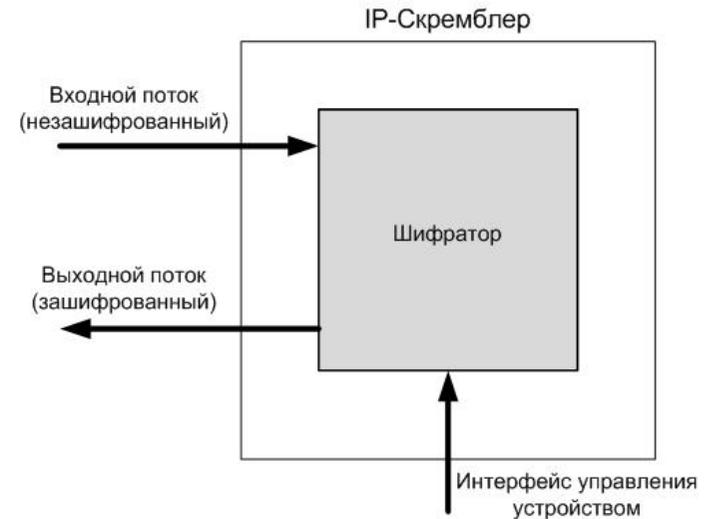


Рис. 1

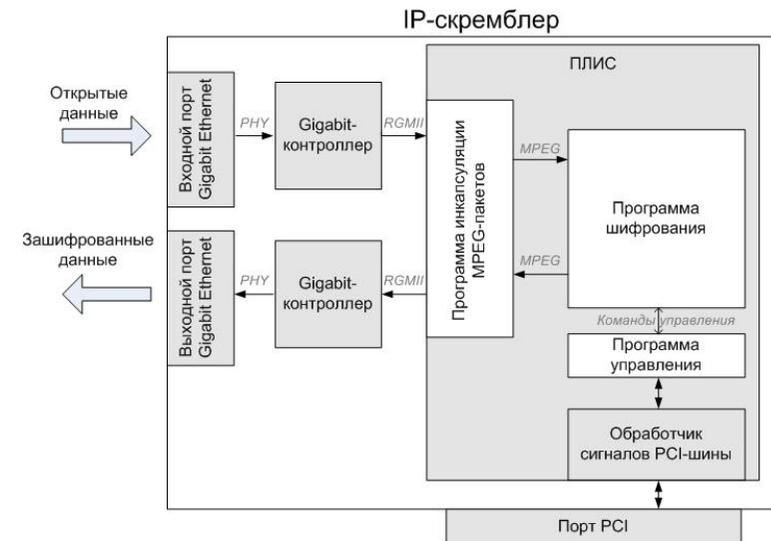


Рис. 2

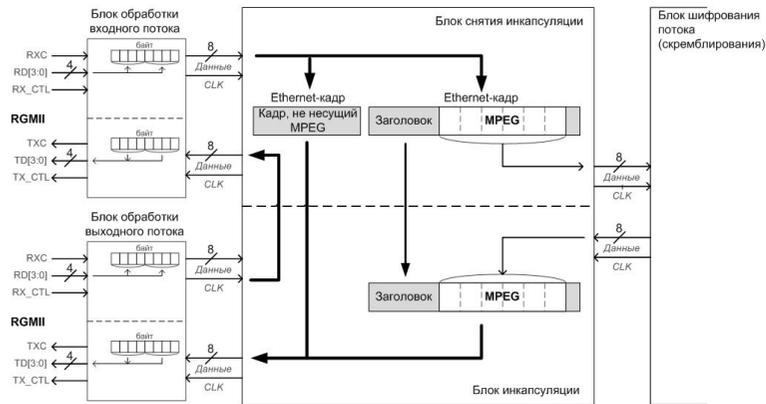


Рис. 3

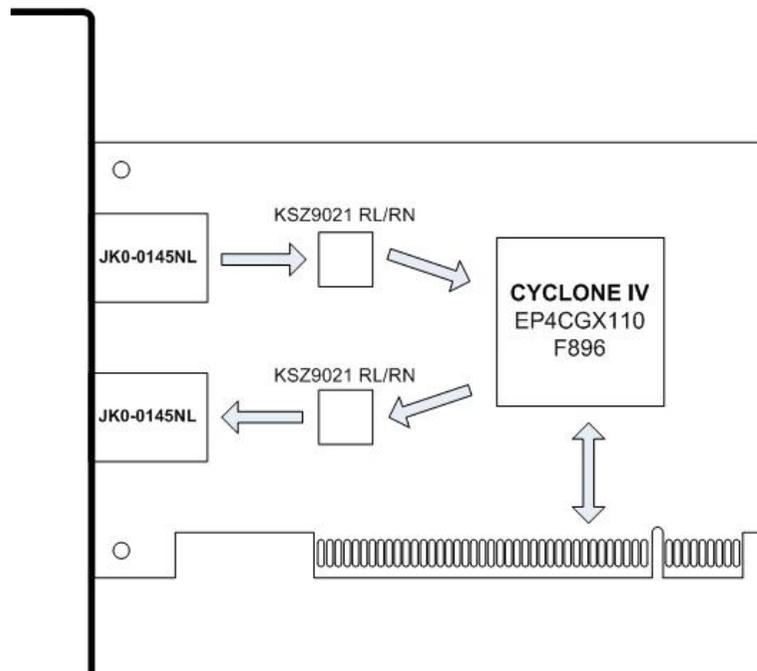


Рис. 4

## Литература

1. ETSI TS 102 034 V1.3.1 (2007-10) Technical Specification, Digital Video Broadcasting (DVB); Transport of MPEG-2 TS Based DVB Services over IP Based Networks. — 128 p.
2. Reduced Gigabit Media Independent Interface (RGMI). 4/1/2002 Version 2.0. Reduced Pin-count Interface For Gigabit Ethernet Physical Layer Devices. — 9 p.
3. Зубарев Ю.Б., Кривошеев М.И., Красносельский И.Н. Цифровое телевизионное вещание. Основы, методы, системы. — М.: Научно-исследовательский институт радио (НИИР), 2001. — 568 с.
4. Олифер В.Г., Олифер Н.А. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы: учебник для вузов. — СПб.: Питер, 2006. — 958 с.
5. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. — М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. — 1104 с.
6. Ричардсон Я. Вideoкодирование. H.264 и MPEG-4 — стандарты нового поколения. — М.: Техносфера, 2005. — 368 с.
7. Гук М. Аппаратные интерфейсы ПК: энциклопедия. — СПб.: Питер, 2002. — 528 с.

УДК 004

В.К. Сарьян, К.О. Беляков

sarian@niir.ru, e@mail

Научно-исследовательский институт радио

**Выявление типовых процессов на базе данных  
автоматизированной медицинской системы  
«Элекард-Мед»**

В докладе приводится описание базы данных, содержащей информацию от первичных лечебных учреждений г. Томска с прикрепленным населением более 50 000 жителей, собираемую на протяжении пяти лет. Поскольку вся информация в базе данных была снабжена временными метками, ее анализ проводился путем развертывания данных по оси времени с группировкой по нозологиям. Был использован метод Гильберта-Хуанга для выявления периодических состав-

ляющих данных. Полученные периодические зависимости были сопоставлены с различными типовыми процессами, связанными с заболеваниями.

Эксперимент показал, что в выборке действительно присутствуют периодические компоненты. Совместно с медицинскими работниками было проведено исследование по выявлению семантики полученных путем описанного анализа результатов и определены соответствующие типовые процессы. Полученные данные снабдили медицинских работников дополнительной, ранее неизвестной информацией о причинах развития болезней. Также были выявлены закономерности, которые могут служить индикатором возникновения эпидемиологических процессов.

### Литература

1. Назаренко А.П., Сарьян В.К. Использование массовых информационно-управленческих сетей (МИУС) для расширения когнитивных возможностей существования человека в техногенной среде // 4-я отраслевая научная конференция-форум «Технологии информационного общества». — М., 2010.

УДК 004

В.К. Сарьян<sup>1</sup>, А.С. Лутохин<sup>2,1</sup>, Н.А. Сущенко<sup>2,1</sup>

sarian@niir.ru, lutokhin.alexander@yandex.ru, skol@ya.ru

<sup>1</sup> Научно-исследовательский институт радио

<sup>2</sup> Московский физико-технический институт  
(государственный университет)

### Новая область применения беспроводных сенсорных сетей

Беспроводные сенсорные сети (БСС) в настоящее время активно развиваются и используются для самых различных задач. Однако нами обнаружена новая обширная область их применения. Ее основная идея состоит в организации управления человеко-машинными объектами в реальном времени при помощи БСС, в частности, в системах индивидуализированного обеспечения безопасности людей

при чрезвычайных ситуациях (ЧС). Данный класс БСС мы называем управленческими сенсорными сетями (УСС). В УСС входят, помимо элементов БСС, также пользовательские терминалы, которые служат для взаимодействия человеко-машинных объектов и УСС, и передачи им различных команд управления, сформированных УСС. При этом для взаимодействия пользовательского терминала с различными УСС нами был предложен межсетевой стандарт на состав и структуру УСС, а также создан единый протокол взаимодействия пользовательских терминалов с различными УСС. Это особенно важно для обеспечения работы массовых беспроводных устройств (например, смартфонов, КПК, нетбуков и т.п.) в качестве пользовательских терминалов.

Так как основной целью УСС является принятие управленческих решений, нами была предложена методика для стандартизованного представления потоков информации, возникающих при принятии этих решений в УСС. Далее, определена наиболее универсальная архитектура построения УСС, при использовании которой управленческие решения принимаются максимально децентрализованно, что, в частности, увеличивает ее устойчивость при отказе ряда объектов УСС, например, в результате ЧС, а также вспомогательные архитектуры построения УСС, позволяющие использовать существующие на сегодняшний день массовые беспроводные устройства в УСС. Применение предложенных решений позволит существенно расширить аудиторию пользователей УСС без необходимости замены абонентских устройств.

Полученное решение защищено патентами, получившими золотые медали на всероссийских и международных конкурсах как лучшие изобретения. На основе разработанных нами стандартов идет работа по созданию рекомендации по построению УСС в Международный союз электросвязи.

### Литература

1. Назаренко А.П., Сарьян В.К. Использование массовых информационно-управленческих сетей (МИУС) для расширения когнитивных возможностей существования человека в техногенной среде // 4-я отраслевая научная конференция-форум «Технологии информационного общества». — М., 2010.

УДК 629.7.017.1

*С.В. Сахно*

s2001@list.ru

Московский физико-технический институт  
(государственный университет)  
Научно-исследовательский институт радио

### Пути повышения устойчивости систем спутниковой связи и вещания

Современный спутник связи и вещания — это сложный комплекс множества взаимодействующих частей и агрегатов.

В настоящее время повышение устойчивости [1] спутников идет по следующим трём направлениям: резервирование модулей, оптимальный выбор элементной базы, кластерное размещение спутников (коллокация).

Принципиально новым подходом с точки зрения повышения устойчивости является путь фракционирования космических аппаратов — изготовления нескольких независимых стандартных модульных блоков вместо одного монолитного космического аппарата [2].

Отдельные свободно летящие модули с полезной нагрузкой питаются электроэнергией от другого свободнолетящего модуля (так называемого ресурсного модуля), основное предназначение которого — выработка энергии и преобразование её в тот вид энергии, который наилучшим образом подходит для передачи к фракционным модулям в конкретной спутниковой системе.

Модули с полезной нагрузкой могут обслуживаться, заменяться и модернизироваться независимо от других модулей полезной нагрузки. Таким образом, фракционируемый космический аппарат представляет собой более гибкую и жизнеспособную систему, чем традиционный монолитный космический аппарат.

Проектирование фракционных космических аппаратов диктует ряд задач, которые необходимо решить для их эффективного создания. Важнейшими являются задачи организации взаимодействия модулей полезной нагрузки с ресурсным модулем, а также выбор способа передачи энергии на данные модули [3, 4, 5].

### Литература

1. *Киселев Л., Маркелов А., Воробьев Б.* Концептуальные основы обеспечения устойчивости сетей связи. — М.: Электросвязь, 1994.
2. *Mohammed J.L.* SpaceCAPS: Automated Mission Planning for the TechSat 21 Formation, Flying Cluster Experiment. — Henke Associates, Inc.
3. *Turner A.* In-Space Power Transfer Bouncing the Light—Fantastic! — Colorado Springs: Fractionated Spacecraft Workshop, 2006.
4. *Сысоев В.К.* Анализ архитектуры лазерного информационно-измерительного канала дистанционной передачи энергии в космосе. — М., 2006.
5. *Bekey I.* Advanced Space System Concepts and technologies: 2010–2030. — El Segundo: The Aerospace Press, 2003.

УДК 621.391.1

*А.А. Хлынов*

a.khlinov@yandex.ru

Московский физико-технический институт  
(государственный университет)  
Научно-исследовательский институт радио

### Исследование принципов реализации турбо-кодека

Рассматривается современная схема кодирования — турбо-код. Приведены результаты моделирования турбо-кодека в гауссовом канале. Рассматривается турбо-код, построенный по стандарту ECSS-E-ST-50-01C [1], в котором описаны основные параметры кодера.

Рассматриваемый турбо-код для декодирования использует алгоритм «мягкий вход — мягкий выход» (Soft Input — Soft Output, SISO) [2, 3]. Этот метод позволяет осуществить непрерывное улучшение способности исправления, когда процесс декодирования повторяется, так как в процессе исправления ошибок передаётся больше информации от выхода одного декодера к входу следующего. Фильтрованный сигнал подается к декодерам, и декодеры обрабатывают амплитуду сигнала для реализации мягкого решения. При этом используются апри-

орные вероятности входных символов и мягкий выход. Мягкий выход предоставляет собой вещественное число, которое является мерой надёжности жёсткого решения декодера. Для вычисления мягкого выхода в рассматриваемом коде используется алгоритм максимума апостериорной вероятности. На каждой итерации декодер обрабатывает каналную последовательность с учётом априорной информации от второго декодера (на первой итерации априорная информация для первого компонентного декодера равна 0). Второй компонентный декодер на первой итерации уже может использовать априорную информацию с первого компонентного декодера. Так с каждой итерацией средняя вероятность ошибки на информационный бит постепенно уменьшается.

Ниже приведены 2 типа зависимости вероятности ошибки на выходе декодера (вероятность ошибки на бит и вероятность ошибки на блок длины  $k$ ). Для каждого вида ошибки приведена соответствующая вероятность ошибки для канала без турбо-кодека.

1. Зависимость от количества итераций декодирования. На графике (рис. 1) изображена зависимость вероятности ошибки в канале с гауссовым шумом без кодирования и после турбо-кодека с различным количеством итераций декодирования. Для тестирования использовался код длины  $k = 8920$ , 10 вариантов кодовых комбинаций и 10 вариантов шума для каждой кодовой посылки, отношение сигнал / шум в канале от 0,5 до 5 дБ с шагом 0,5 дБ, количество итераций  $I = 1, 2$  и 4. При увеличении числа итераций, как видно из графика, значительно улучшается исправляющая способность примерно на 1 дБ при 2-х итерациях и на 1,5 дБ при 4-х итерациях декодирования. При разработке декодера возможно использование фиксированного числа итераций, либо декодера с критерием остановки итераций, основанным на сравнении контрольных сумм, который может остановить итерации при условии исправления всех ошибок в блоке.
2. Зависимость от наличия дискретизатора на входе декодера. На графике (рис. 2) изображена зависимость вероятности ошибки в канале с гауссовым шумом без кодирования и после турбо-кодека с наличием дискретизатора и ограничителя сигнала на входе декодера и без них. Для тестирования использовался код длины  $k = 8920$ , 20 вариантов кодовых комбинаций и 10 вариантов шума для каждой кодовой посылки, отношение сигнал

/ шум в канале от 0,5 до 5 дБ с шагом 0,5 дБ, градации сигнала на входе декодера от  $-7$  до  $+7$  с шагом 1. Исправляющая способность от наличия дискретизатора и ограничителя, как видно из графика (рис. 2), ухудшается примерно на 0,5 дБ. При наличии ограниченной точности вычислений и ограничении разрядности при практической реализации, исправляющая способность уменьшится ещё сильнее.

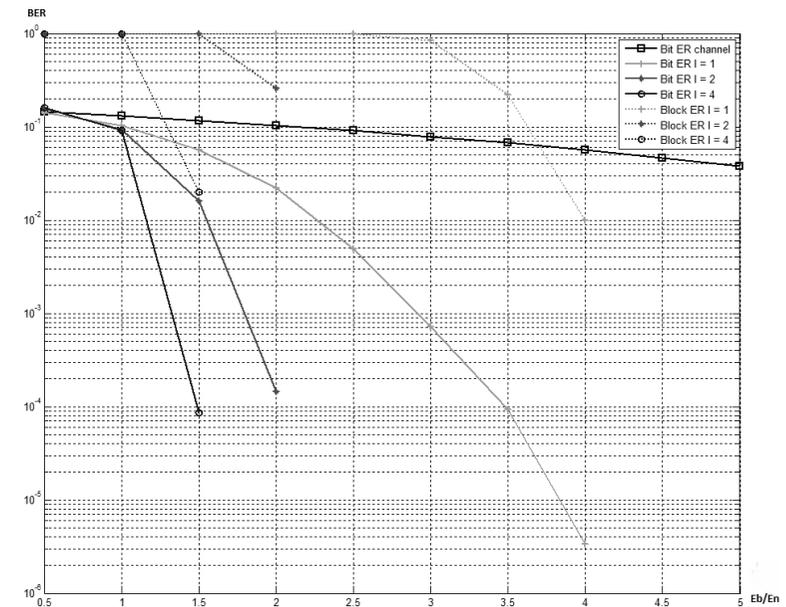


Рис. 1. Зависимость вероятности ошибки от количества итераций декодирования

## Литература

1. Space data links — Telemetry synchronization and channel coding ECSS-E-ST-50-01C // ESA Requirements and Standards Division ESTEC. — 2008.
2. Шлома А.М., Бакулин М.Г., Крейнделин В.Б., Шумов А.П. Новые алгоритмы формирования и обработки сигналов в системах подвижной связи / под редакцией профессора А.М. Шломы. — М.: Горячая линия–Телеком, 2008. — 344 с.

3. Морелос—Сарагоса Р. Искусство помехоустойчивого кодирования. Методы, алгоритмы, применение. — М.: Техносфера, 2006. — 320 с.

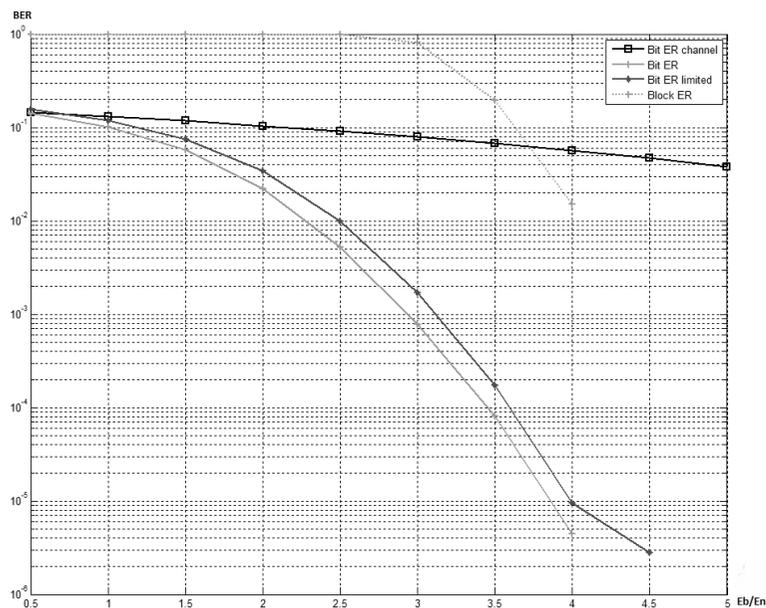


Рис. 2. Зависимость вероятности ошибки от наличия дискретизатора на входе декодера

УДК 621.376

А.Л. Шижкин

sisoid@frtk.ru

Московский физико-технический институт  
(государственный университет)

Научно-исследовательский институт радио

### Преимущества восьмипозиционной квадратурной амплитудной модуляции при малых значениях соотношения сигнал / шум

Разработанные в 1993 году турбо-коды позволили значительно приблизиться к пределу Шеннона по сравнению с используемыми ранее кодами. В последующие годы внедрение в телекоммуникационные системы кодов с малой плотностью проверок на четность (МПП-кодов) позволило добиться еще большей близости к пределу Шеннона. МПП-коды сложнее в реализации, чем турбо-коды и вносят большую задержку в передаваемый сигнал. Но при малых значениях соотношения сигнал / шум они позволяют обеспечить энергетический выигрыш порядка 1 децибела по сравнению с турбо-кодами. Поэтому в каналах с высоким уровнем шумов, где требования на вносимые в сигнал задержки незначительны, целесообразно использовать именно МПП-коды. К таким каналам можно отнести, например, цифровое спутниковое вещание.

Так как МПП-коды находят применение в каналах с высоким уровнем шумов, то для качественной их работы необходимо обеспечить тактовую и фазовую синхронизацию сигнала в демодуляторе при малых значениях соотношения сигнал / шум. Для широко распространенного созвездия 8-PSK такую синхронизацию обеспечить сложно. Поэтому фирмой «Comtech EF Data» предложено использовать в таких случаях сигнальное созвездие 8-QAM, которое в силу своих свойств позволяет обеспечить фазовую синхронизацию при больших шумах, обладая при этом той же спектральной эффективностью, что и 8-PSK.

В данной работе проведено сравнение характеристик сигналов, модулированных 8-PSK и 8-QAM, с использованием имитационной модели спутникового демодулятора, содержащей устройства тактовой синхронизации и фазовой подстройки. Так как предложенный

«Comtech EF Data» стандарт является закрытым, нами предложен собственный алгоритм восстановления фазового синхронизма для созвездия 8-QAM на основе решения задачи линейной регрессии.

УДК 621.376

*А.Л. Шиликин<sup>1,2</sup>, М.А. Карпова<sup>1,2</sup>*

*sisoid@frtk.ru, m.a.karpova@inbox.ru*

<sup>1</sup> Московский физико-технический институт  
(государственный университет)

<sup>2</sup> Научно-исследовательский институт радио

### **Валидация модели демодулятора цифрового спутникового сигнала**

В процессе разработки современных телекоммуникационных устройств значимую роль играет имитационное компьютерное моделирование. Вне зависимости от типа моделируемого устройства и сложности модели она должна соответствовать реальному ходу явлений, для описания которых создана. При этом хорошим признаком достоверности модели служит возможность воспроизводить на физическом объекте результаты экспериментов, полученные ранее только при моделировании. Если моделирование дает результаты, совпадающие с наблюдаемыми при исследовании физического объекта не только качественно, но и количественно, то можно говорить об успешной валидации модели.

В рамках научно-исследовательской работы нами была создана модель демодулятора цифрового спутникового сигнала, которая имитирует, в частности, следующие устройства: фазовой автоподстройки несущей частоты, автоматической регулировки усиления, восстановления тактовой частоты, адаптивной коррекции межсимвольной интерференции. Модель имеет сложную многоуровневую структуру, достаточно точно соответствующую функциональной структуре спутниковых демодуляторов. Но для того чтобы использовать результаты, полученные с помощью нашей модели на практике, необходимо провести ее валидацию.

В результате серии экспериментов нам удалось убедиться, что свойства смоделированных устройств соответствуют свойствам их

прототипов. Кроме того, при работе с моделью при определенных параметрах был получен результат, не наблюдавшийся ранее при эксплуатации спутниковых модемов. Нам удалось воссоздать эти параметры в натурном эксперименте и подтвердить полученный при моделировании результат.

## Секция радиотехники и защиты информации

УДК 539.12.04

*И.В. Акиншин, В.И. Бзыта, Е.Г. Варюхин,  
Е.А. Дубровин, В.С. Егоров, Д.И. Крохалев,  
С.Н. Матюхевич*

12 Центральный научно-исследовательский институт МО РФ

### Методы и средства испытаний крупногабаритных образцов вооружения и военной техники на действие электромагнитных полей радиотехнических средств

В соответствии с требованиями нормативных документов, действующих в Вооруженных Силах Российской Федерации, проведение испытаний на стойкость и безопасность использования образцов вооружения и военной техники (ВВТ) при воздействии электромагнитных помех (ЭМП) радиотехнических систем (РТС) предусматривается прямым методом, при котором испытываемый образец ВВТ подвергается воздействию ЭМП немодулированных гармонических колебаний.

Реализация заданных в военных стандартах параметров ЭМП РТС в низкочастотной части спектра, где для обеспечения заданных уровней нагружения необходимо применение источника сигнала большой мощности и протяженных антенных систем, является технически сложным и чрезвычайно дорогостоящим проектом, а для крупногабаритных образцов ВВТ практически нереализуемым.

В ФГУ «12 ЦНИИ Минобороны России» разработаны и внедрены в практику проведения испытаний предложения по расширению возможностей прямого метода испытаний, а также исследованы возможности косвенного и комбинированных методов и разработаны рекомендации по их применению.

Для расширения возможностей прямого метода испытаний предложены следующие научно-технические решения.

1. Для увеличения эффективности использования энергии источника сигнала и снижения помехоэмиссии для генерации ЭМП вместо излучающих антенн предлагается использовать специально разработанные направляющие системы в виде полосковых линий [1, 2].
2. При испытаниях образцов ВВТ на безопасность использования технические возможности имитаторов не позволяют воспроизвести в требуемом объеме заданные параметры ЭМП, в связи с чем предлагается облучение объекта испытаний производить ЭМП меньшей амплитуды с последующим пересчетом на заданные уровни воздействия [2].
3. Предлагается использовать метод локального облучения, при котором ЭМП воздействуют на фрагмент объекта с рецепторами электромагнитной энергии (неоднородностями, чувствительными элементами и т.п.).
4. В ряде случаев предлагается использовать косвенный и комбинированный методы испытаний. Суть косвенного метода заключается в воспроизведении не самих ЭМП, а результатов их действия в виде наведенных токов и напряжений на корпусе объекта испытаний. Комбинированный метод испытаний является сочетанием прямого и косвенного методов испытаний [3].

Результаты проведенных исследований указывают на принципиальную возможность использования косвенного метода при испытаниях крупногабаритных образцов ВВТ на действие гармонических ЭМП. Однако для выбора и обоснования параметров испытательных воздействий необходимы предварительные оценки.

Для реализации рассмотренных методов испытаний крупногабаритных образцов ВВТ на действие гармонических ЭМП на экспериментально-испытательной базе ФГУ «12 ЦНИИ Минобороны России» созданы соответствующие установки-имитаторы.

### Литература

1. *Крохалев Д.И.* Методы расчета импульсных электромагнитных процессов // Методическое пособие. — М.: МИЭМ, 2007. — 52 с.

2. Балюк Н.В., Дубровин Е.А., Крохалев Д.И., Матюхевич С.Н., Сидорюк П.А. Расчет токов, наведенных гармоническим электромагнитным полем на проводящий объект произвольной формы, методом моментов // Сборник докладов 9 российской научно-технической конференции ЭМС-2006 «Электромагнитная совместимость технических средств и электромагнитная безопасность». — СПб., 2006. — С. 320–323.

3. Варюхин Е.Г., Крохалев Д.И., Матюхевич С.Н., Сидорюк П.А. Методы воспроизведения действия мощных гармонических электромагнитных полей на объекты испытаний // Сборник докладов 9 российской научно-технической конференции ЭМС-2006 «Электромагнитная совместимость технических средств и электромагнитная безопасность». — СПб., 2006. — С. 414–419.

УДК 519.688

С.М. Владимиров

vlsergey@gmail.com

Московский физико-технический институт  
(государственный университет)

### Новый итеративный алгоритм декодирования кодов с малой плотностью проверок на чётность в сетевом кодировании для двоичных каналов со стиранием на основе message-passing-алгоритма

Использование нового алгоритма для МППЧ-кодов в сетевом кодировании даёт преимущества по сравнению со стандартным алгоритмом. Но теоретическая оценка затруднена, так как в основе лежит sum-product-алгоритм мягкого декодирования. В работе показывается возможность аналогичного изменения «жесткого» message-passing-алгоритма. Он работает не с вероятностями, а с конкретными значениями битов, а также с флагом «стёртого» бита. Отличается большей производительностью, но используется только для каналов со стиранием.

В модели сети с сетевым кодированием «бабочка» [2] под  $\vec{a}$  и  $\vec{b}$  будем понимать две части некоторого передаваемого кодового слова  $\vec{m}$  МППЧ-кода. В процессе передачи может происходить линей-

ная рекомбинация частей сообщения, также в них могут появляться стёртые биты. По стандартному способу декодирования исходного сообщения в приёмниках восстанавливается каждая из его частей, после чего декодируется код и восстанавливаются стёртые биты. Обозначим принятые сообщения через  $\vec{m}_1$  и  $\vec{m}_2$ . Тогда без ограничения общности для левого приёмника исходные части сообщения (со стираниями) восстанавливаются как

$$\vec{a}' = \vec{m}_1, \quad \vec{b}' = \vec{m}_1 \oplus \vec{m}_2.$$

После этого конструируется вектор  $\vec{m}'$  простой конкатенацией:  $\vec{m}' = \vec{a}' || \vec{b}'$ , далее — итеративным алгоритмом с распространением сообщений. Рассматриваем канал со стиранием, поэтому некоторые биты в каждом из векторов  $\vec{a}'$ ,  $\vec{b}'$ ,  $\vec{m}_1$ ,  $\vec{m}_2$ ,  $\vec{m}'$  стёрты. В результате если приёмник получил только единственный стёртый бит в векторе  $\vec{m}_1$ , то на входе МППЧ-декодера будет уже два стёртых бита — по одному в векторах  $\vec{a}'$  и  $\vec{b}'$ , а также соответствующим им два стёртых бита в векторе  $\vec{m}'$ .

Предлагается новый способ декодирования, когда операция восстановления исходных частей сообщения включается в алгоритм декодирования  $\vec{m}'$  из принятых сообщений  $\vec{m}_1$  и  $\vec{m}_2$  с помощью итеративного декодирования. Пусть  $H$  — проверочная матрица выбранного МППЧ-кода.

Построим двоичный вектор  $\vec{x}$  как конкатенацию нулей и принятых сообщений:

$$\vec{x} = \overline{0-0} || \vec{m}_1 || \vec{m}_2.$$

Первая часть вектора (нули) по размеру совпадает с размером исходного сообщения  $\vec{m}$ . Таким образом, размерность вектора  $\vec{x}$  будет равна удвоенной размерности исходного вектора  $\vec{m}'$ . Считаем, что первые биты стёрты. Построим проверочную матрицу:

$$H' = \left\| \begin{array}{cccc} H & 0_l & 0_l & \\ E_l & 0_l & E_l & 0_l \\ E_l & E_l & E_l & 0_l \end{array} \right\|.$$

Здесь  $E_l$  — единичная матрица размера  $l = n/2$ , где  $n$  — длина исходного кодового слова  $\vec{m}$ ,  $0_l$  — нулевые матрицы. Матрицу используем для итеративного «декодирования» сообщения  $\vec{x}$ , а именно для восстановления первых  $n = l/2$  бит. Эти биты считаем за восстановленное исходное сообщение.

Как показано на рис. 1, новый алгоритм даёт преимущество даже в канале со стиранием. При этом использование восстановленного методом Гаусса  $\vec{m}'$  в качестве первой части вектора  $\vec{x}$ , необходимое для обобщения на большее число сообщений [3], не влияет на качество декодирования, в отличие от использования в гауссовом канале [1, 3].

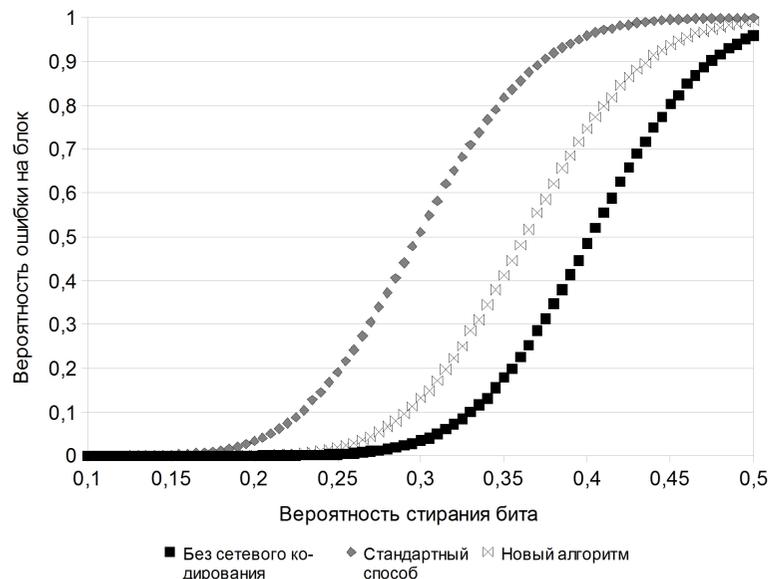


Рис. 1. Вероятность ошибки в блоке в зависимости от вероятности стирания бита в канале. Показаны стандартный message-passing-алгоритм декодирования, улучшенный алгоритм и случай без сетевого кодирования

### Литература

1. Kang J., Zhou B., Ding Z., Lin S. LDPC coding schemes for error control in a multicast network // Information Theory. ISIT 2008. IEEE International Symposium. — 2008. — P. 822–826.
2. Ahlswede R., Cai N., Li S.R., Yeung R.W. Network information flow // IEEE Transactions on Information Theory. — 2000. — V. 46. — P. 1204–1216.
3. Владимиров С.М. Обобщение нового алгоритма декодирования МПЧ-кодов для сетевого кодирования на произвольное число частей сообщения // Системы управления и информационные технологии. — 2010. — № 3(41). — С. 73–75.

УДК 517.9

*Н.И. Пилипчук, Э.М. Габидуллин*

pilipchuk.nina@gmail.com, ernst.gabidulin@gmail.com

Московский физико-технический институт  
(государственный университет)

### Итеративное декодирование многокомпонентных кодов

В работах Силвы, Коёттера и Кшишанга [1] для сетей связи разработан новый метод подпространственного кодирования, названный случайным сетевым кодированием. Для краткости назовем случайные сетевые коды по первым буквам фамилий авторов СКК-кодами. Сетевые коды построены на базе ранговых кодов Габидулина [2]. Здесь представлены новые методы сетевого кодирования, названные многокомпонентными кодами. Они характеризуются большой мощностью, следовательно, повышенной скоростью передачи. Для них построен итеративный алгоритм декодирования и исследованы основные характеристики.

СКК-код — это множество порождающих матриц  $X$  так называемой лифтинговой конструкции следующего вида:  $X = [ I \ M ]$ ,  $I$  — единичная матрица,  $M$  — кодовая матрица рангового кода. Для сети с одним источником и одним получателем использована следующая модель:  $Y = AX + E_{out}$ , где  $A$  — случайная матрица, описывающая линейные преобразования передаваемых сообщений-пакетов,  $E_{out}$  — матрица ошибок.

После предварительных линейных преобразований, включающих процедуру гауссова исключения и добавления нулевых строк, проблема декодирования СКК-кода сведена к декодированию искаженной матрицы рангового кода, у которой предварительно найден ранг стирания строк, ранг стирания столбцов и оценен ранг ошибки. Алгоритм декодирования ранговых кодов известен [3, 4].

Многокомпонентный код — это объединение нескольких попарно непересекающихся компонентных кодов [5]. Пусть  $N = mk$ , где  $m$  и  $k$  — целые числа. Кодовая матрица кода  $C_1$  является конкатенацией единичной матрицы порядка  $m$  и матрицы рангового кода  $M_1$  размера  $m \times (N - m)$ . Кодовая матрица кода  $C_2$  является конкатенацией нулевой матрицы порядка  $m$ , единичной матрицы порядка  $m$

и матрицы рангового кода  $M_2$  размера  $m \times (N - 2m)$  и т.д. Кодовая матрица кода  $C_{k-1}$  является конкатенацией  $k - 2$  нулевых матриц порядка  $m$ , единичной матрицы порядка  $m$  и матрицы рангового кода  $M_{k-1}$  размера  $m \times (N - (k - 1)m)$ .

Последний,  $k$ -й компонентный код состоит только из  $k - 1$  нулевых матриц порядка  $m$  и единичной матрицы порядка  $m$ .

Пусть  $M_1, M_2, \dots, M_{k-1}$  — ранговые коды с максимальным ранговым расстоянием  $d_r = m$ . Тогда построенная выше конструкция представляет многокомпонентный код, характеризуемый подпространственным расстоянием  $d(C) = 2d_r = 2m$  и мощностью  $Card\{C\} = \sum_{p=1}^{k-1} q^{m(m-d_r+1)p} + 1$ . Такой код является оптимальным постоянной размерности с постоянным подпространственным расстоянием  $d = 2m$  [5].

Алгоритм декодирования состоит из нескольких шагов. Задачей первого шага является определение первой левой матрицы конкатенации, является ли она нулевой или единичной. С этой целью вычисляется ранг первой принятой матрицы  $Y_1$ . Если ранг матрицы больше или равен  $\frac{m}{2}$ , то считается, что передавалась единичная матрица. Тогда второй шаг состоит в применении алгоритма декодирования СКК-кода, включающего предварительные линейные преобразования и исправление ошибок и стираний рангового кода. Если ранг  $Y_1$  меньше  $\frac{m}{2}$ , то считается, что передавалась нулевая матрица. Тогда второй шаг состоит в определении следующей матрицы конкатенации, является ли она единичной или нулевой. Сдвиг вправо происходит до тех пор, пока не будет определена единичная матрица. После этого подключается алгоритм декодирования СКК-кода.

Показано, что алгоритм декодирования правильно определяет нулевые и единичные матрицы, если ранг матрицы ошибок в сети меньше половины строк матрицы.

### Литература

1. *Silva D., Kschischang F.R., Koetter R.* A Rank-Metric Approach to Error Control in Random Network Coding // IEEE Transactions on Information Theory. — 2008. — V. IT-54, N. 9. — P. 3951–3967.

2. *Габидуллин Э.М.* Теория кодов с максимальным ранговым расстоянием // Проблемы передачи информации. — 1985. — Т. 21, № 1. — С. 1–12.

3. *Gabidulin E.M., Pilipchuk N.I.* Error and Erasure Correcting Algorithms for Rank Codes // Designs, Codes and Cryptography. — 2008. — V. 49, N. 1.

4. *Габидуллин Э.М., Боссерт М.* Алгебраические коды для сетевого кодирования // Проблемы передачи информации. — 2009. — Т. 45. — С. 3–18.

УДК 004.421.5

*А.Ю. Софронов, Е.А. Швец*

xandr74@frtk.ru, lhj7362@gmail.com

Московский физико-технический институт  
(государственный университет)

### Проектирование и исследование функций, улучшающих статистические свойства псевдослучайных последовательностей

Критерием оценки статистических свойств последовательностей является прохождение тестов Национального института стандартов и технологий валидации псевдослучайных последовательностей [1, 2].

Рассматриваем четыре функции, улучшающих криптографические свойства входной последовательности. Каждая из них воздействует на определенные свойства последовательности. Функции делятся на два класса: первый класс изменяет входную последовательность при помощи сложения по модулю 2 исходной последовательности и последовательности, созданной функцией; второй класс изменяет уже имеющуюся последовательность, используя ее как аргумент для функции.

Исследование показало, что порядок применения функций очень важен, так как результат выполнения функции второго класса зависит от исходной последовательности.

Применение созданных функций к последовательностям, полученным с помощью встроенных генераторов различных языков программирования (C, Java, Python), не ухудшает свойства этих последовательностей.

Обнаружилось, что повторное применение одних функций не улучшает свойства последовательности, повторное же использование

иных с измененными параметрами существенно улучшает свойства последовательности.

Описание функций.

«Бинарное инвертирование», «Инвертирование в поле Галуа» [3, 4] — функции создают последовательность длины, равной длине входной последовательности и складывают обе последовательности побитово по модулю 2. Их совместное применение улучшает частотные, блочно-частотные свойства и кумулятивные суммы последовательности, а также позволяет эффективно применять следующие функции благодаря приданию последовательности вышеперечисленных свойств.

«Циклические сдвиги» — последовательность разбивается на блоки, длины которых выбраны с использованием теории групп. Внутри каждого блока производятся циклические сдвиги. Ее применение позволяет пройти тесты на линейную сложность, ранг бинарной матрицы, улучшаются результаты теста на быстрое преобразование Фурье.

Важно отметить, что с помощью первых трех функций можно заставить последовательность пройти все тесты НИСТ. Для этого их следует запустить по очереди 3–5 раз каждую в зависимости от набора параметров.

«Линейное преобразование блоков» [5] — функция разбивает последовательность на блоки. Затем каждый блок подается как переменная линейному многочлену, и результат записывается вместо блока. Операция производится в поле Галуа.

Применение этой функции к последовательности, «пропущенной» через первые три, позволяет этой последовательности пройти все тесты НИСТ.

### Литература

1. URL: [http://csrc.nist.gov/groups/ST/toolkit/rng/stats\\_tests.html](http://csrc.nist.gov/groups/ST/toolkit/rng/stats_tests.html)
2. *Menezes A., Oorschot P., Vanstone S.* Handbook of Applied Cryptography. — CRC-Press, 1996. — 816 p.
3. *Сагалович Ю.Л.* Введение в алгебраические коды. — М.: МФТИ, 2007. — 262 с.
4. *Кнут Д.Е.* Искусство программирования. Т 2. Получисленные алгоритмы. — М.: Вильямс, 2000. — 500 с.
5. *Шнайер Б.* Прикладная криптография. — М.: Триумф, 2002. — 816 с.

УДК 519.725.2

*И.Ю. Сысоев*

Igor.Sisoev@gmail.com

Московский физико-технический институт  
(государственный университет)

### Вычисление синдрома при декодировании рангового кода, построенного на слабо самоортогональном базисе

Вычислительные затраты на нахождение синдрома рангового кода (см. [3]) составляют существенную часть (до половины) от общих вычислительных затрат на декодирование рангового кода. В работе [1] было предложено использовать слабо самоортогональный базис (см. [2]) для снижения сложности вычисления синдрома рангового кода. Например, для поля размерности  $N = 8$  такой базис будет иметь вид:

$$b_1 = (1, f_1, f_2, f_2 f_1, f_3, f_3 f_1, f_3 f_2, f_3 f_2 f_1). \quad (1)$$

Причем на каждый вектор  $f_i$  накладывается условие

$$f_i^{2^{2^i-1}+1} = 1, \quad i = 1, 2, 3. \quad (2)$$

Тогда, аналогично методу Карацубы–Офмана [4], вычисления в исходном поле размерности  $N$  можно заменить вычислениями в полях Галуа размерности  $N/2$ ,  $N/4$ ,  $N/8$  и т.д. [1]. Упрощенный алгоритм вычисления в этом случае будет состоять из следующих шагов: а) переход из стандартного базиса в слабоортогональный; б) выполнение операции сдвига и расчёт произведений в поле размерности  $N/2$ ; в) преобразование результата в исходный базис. Операция сдвига возникает из-за умножения промежуточного результата на неединичный базисный вектор наименьшей степени  $f_{\min}$  (для базиса (1) это будет вектор  $f_3$ ). Пусть кодовые векторы представлены в стандартном базисе. Чтобы построить матрицу перехода из слабо самоортогонального базиса в исходный стандартный, необходимо вектору  $f_{\min}$  поставить в соответствие вектор, который равняется примитивному элементу поля в степени  $N/2$  (для базиса (1) это будет вектор  $\alpha^4$ ). Поскольку остальные векторы, кроме единичного, представлены либо как комбинация произведений векторов  $f_i$  ( $f_i \neq f_{\min}$ ) (множество  $A$ ), либо как

эти же комбинации, умноженные на вектор  $f_{\min}$  (множество В). Можно показать, что подпространству, образуемому каждым вектором  $f_i$  ( $f_i \neq f_{\min}$ ), можно поставить во взаимно однозначное соответствие подпространство, образуемое векторами  $y_i$  с такими же условиями (2), но из поля  $GF(p^{N/2})$ . Тогда базисные векторы из множества А будут поставлены в соответствие векторам  $y_i$ , записанным в младших  $N/2$  разрядах, а векторы из множества В будут поставлены в соответствие тем же векторам  $y_i$ , но записанным в старших  $N/2$  разрядах. Операции умножения будут выполняться аналогично (см. [1]):

$$f_i \cdot f_j \in \text{Мн.А}; (f_{\min} \cdot f_i) \cdot f_j \in \text{Мн.В}; \quad (3)$$

$$f_{\min} \cdot f_{\min} = \alpha f_{\min} + \beta; \beta \in \text{Мн.А}; \alpha f_{\min} \in \text{Мн.В}. \quad (4)$$

Если проверочную матрицу рангового кода составить из базисных степеней базисных векторов (см. [1]), то благодаря предложенным операциям умножения (3) и (4) упрощается этап вычисления синдрома рангового кода (см. [1]).

### Литература

1. Gabidulin E.M., Sysoev I.Y. Rank codes using weak self-orthogonal bases // Proc. 2010 IEEE Region 8 International Conference on Computational Technologies in Electrical and Electronics Engineering. — 2010. — P. 70–71.
2. Gabidulin E.M., Pilipchuk N.I. Symmetric matrices and codes correcting rank errors beyond the  $\lfloor (d-1)/2 \rfloor$  bound // Discrete Applied Mathematics. — 2006. — V. 154, N. 2. — P. 305–312.
3. Габидулин Э.М. Теория кодов с максимальным ранговым расстоянием // Проблемы передачи информации. — 1985. — Т. 21, № 1. — С. 3–16.
4. Афанасьев В.Б., Габидулин Э.М. Кодирование в радиоэлектронике. — М.: Радио и связь, 1986. — 176 с.

УДК 621.391

Ю.Д. Украинцев<sup>1</sup>, К.Ю. Украинцев<sup>1</sup>, Н.Н. Щелкунов<sup>2</sup>  
9016451930@mail.ru, aveswood@rambler.ru, gk\_kkaev@mail.ru

<sup>1</sup> Ульяновский государственный технический университет

<sup>2</sup> Московский физико-технический институт  
(государственный университет)

### Методы непараметрической идентификации плотности распределения вероятностей мгновенных значений сигналов и помех, наблюдаемых на входе радиоприемного устройства

Целью настоящей статьи является представление алгоритма идентификации неизвестной ПРВ мгновенных значений огибающей сигнала на основе рекуррентной процедуры Парзена–Розенблатта. Пусть на входе радиоприемного устройства наблюдается выборка независимых, одинаково распределенных мгновенных значений огибающей принимаемого сигнала  $x = x_1, x_2 \dots x_n$  неизвестной плотности распределения вероятностей  $W(x)$ .

Требуется на основе непараметрической парзеновской оценки определить ПРВ  $W(x)$  и произвести ее идентификацию с известным классом распределений.

Решение поставленной задачи проведем с помощью рекуррентной парзеновской процедуры [9, 10]:

$$\hat{W}_n(x) = w_{n-1}(x) + \frac{1}{n}(w_{n-1}(x) + \frac{1}{h_n}K(y)), \quad (1)$$

где  $\hat{W}_n(x)$  — оценочное значение  $W(x)$  при ограниченном объеме выборки;  $K(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi \cdot h_n}} \exp(-\frac{y-x_i}{h_n^2})$  — аппроксимирующая функция (ядро), где  $h_n = C \cdot N^{-\theta}$  — ширина аппроксимирующего ядра;  $C$  — параметр масштаба;  $0 < \theta < \frac{1}{2}$ ;  $N$  — объем выборки;  $x_i$  — текущее значение огибающей сигнала;  $x$  — значение из интервала оценки (ПРВ).

Оценку качества решение поставленной задачи проведем с помощью критерия Колмогорова–Смирнова [1]:

$\delta_{[N]} = \max |W(x) - W_{[N]}(x)|$  где  $W_{[N]}(X)$  и  $W(X)$  — соответственно истинная и теоретическая плотности распределения вероятностей принимаемого сигнала.

В работе [1] показано, что данный критерий наиболее эффективен в тех случаях, когда объем выборки  $N$  достаточно велик ( $N > 100$ ).

Для достижения вероятности ошибочной идентификации не хуже  $3 \cdot 10^{-3}$  используем уровень значимости  $\lambda = 0,4$ . При этом если  $\lambda_{[N]} \geq \lambda_{кр}$ , то гипотеза о принадлежности ПРВ сигнала теоретической отвергается. Выполнение неравенства  $\lambda_{[N]} < \lambda_{кр}$  свидетельствует о том, что опытные данные согласуются с гипотезой, то есть выборка соответствует конкретной теоретической ПРВ.

В ходе имитационного моделирования установлено:

— при оптимально подобранных параметрах аппроксимирующего ядра и объеме выборки, равной 1000, с надежностью 0,997 восстанавливается истинная ПРВ, что особенно важно при проведении статистических испытаний линий связи перед вводом их в эксплуатацию;

— с высокой достоверностью оценивается ПРВ нормального закона распределения (не только мода, но и ее «хвосты»), что дает возможность изучить в дальнейшем алгоритмы классификации сигналов и помех классическим методом максимального правдоподобия при использовании данных не многолетних данных статистических испытаний, а текущей статистики, обработанной методом Парзена–Розенблатта;

— независимо от закона распределения при объеме выборки, равном 1000, с высокой точностью оценивается наиболее вероятное значение сигнала (мода), что позволяет в будущем классифицировать наличие помех на основе сдвига не выборочного среднего, а моды, как наиболее вероятного значения;

— анализ скорости проводимых вычислений показывает, что это время, равное 10 мс, меньше времени, необходимого для работы преобразователя речи.

## Литература

1. Смирнов Н.В. Асимптотическая мощность некоторых непараметрических критериев // Труды Всесоюзного совещания по математической статистике. — Ереван, 1960.

УДК 621.391

*А.В. Уривский*

alexey.urivskiy@mail.ru

ОАО «Инфотекс»

Московский физико-технический институт  
(государственный университет)

## Об исправлении ошибок в штриховых кодах

Широкое распространение получило машиночитаемое графическое представление информации в виде штриховых кодов (ШК). ШК состоит из набора знаков, каждый из которых кодирует некоторый цифровой или цифробуквенный знак. При разработке символики ШК принимаются меры для повышения надежности считывания. Как правило, реализуется самоконтроль каждого знака ШК и один из знаков в ШК используется как контрольный, что позволяет обнаружить небольшие искажения в нескольких знаках и любое искажение в одном знаке. Однако при сильных искажениях необходимо не только обнаруживать, но и исправлять возникающие ошибки, что обычно реализуется с помощью помехоустойчивых кодов.

Если число различных значений знака ШК (размер алфавита) представляет степень простого числа, то можно использовать хорошо разработанную технику  $q$ -ичных кодов, исправляющих ошибки в хэмминговой метрике. В случае если размер алфавита есть число составное, выбор «хорошего» кода представляет непростую задачу.

Формализуем задачу. Необходимо построить корректирующий код над алфавитом из  $s$  элементов, где  $s$  не есть степень простого числа. Один из возможных подходов следующий. Выбирается код  $C$  над конечным полем  $GF(q)$ ,  $s < q$ . Среди всех кодовых слов кода  $C$  выбираются те, кодовые элементы которых принадлежат подмножеству  $S \subset GF(q)$  такому, что  $|S| = s$ . Таким образом, мы рассматриваем подкод  $C_S$  кода  $C$  над подмножеством  $S$ .

В общем случае подкод  $C_S$  является нелинейным и важный вопрос с точки зрения практического использования состоит в том, какова его мощность  $M_S$ .

Для оценки мощности подкода над подмножеством рассмотрим проверочную матрицу родительского  $(n, n - r)$  кода  $C$  в систематическом виде  $H = (E_r A)$ , где  $E_r$  — единичная матрица порядка  $r$ . Пусть  $a_{ij}$  — элементы матрицы  $A$ . Можно доказать следующую лемму.

Лемма. Если существует  $j \in [1, n - r]$  такое, что  $a_{ij} \neq 0$  для всех  $i \in [1, r]$ , то

$$M_S \geq s^{n-r-1}(s - (q - s)r).$$

Пример. Код длины 12 над десятичным алфавитом, исправляющий одну ошибку, строится из расширенного (12, 10)-кода Рида-Соломона над  $GF(11)$ . Можно показать, что для такого кода условие леммы выполняется. Мощность искомого подкода  $C_S$  составит не менее  $8 \cdot 10^9$  слов.

## Список представленных организаций

### Университеты и другие учебные учреждения

Московский государственный технический университет  
им. Н.Э. Баумана

Московский государственный университет технологий и управления

Московский физико-технический институт  
(государственный университет)

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Пензенский государственный университет

Российский университет дружбы народов

Ульяновский государственный технический университет

### Исследовательские институты

12 Центральный научно-исследовательский институт МО РФ

Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

Институт системного анализа РАН

Институт точной механики и вычислительной техники  
им. С.А. Лебедева РАН

Институт электронных управляющих машин

Концерт радиостроения «Вега»

Научно-исследовательский институт радио

Украинский научно-исследовательский институт связи

Центральный экономико-математический институт РАН

### Коммерческие компании

АФК «Система»

ЗАО «Инструментальные системы»

ЗАО «Интел А/О»

ЗАО «Когнитивные технологии»

ЗАО «МЦСТ»

Концерн «Радиотехнические и информационные системы»

ОАО «Инфотекс»

ООО «Даймонд Кволити»

ООО «НетКрэкер»

ООО «Уличные лазеры»

ПрАО «МТС Украина»

## Именной указатель

- |  |                       |                        |
|--|-----------------------|------------------------|
| <b>А</b>   | Дугин А.О. 66         | Любецкий В.А. 118, 123 |
| Акиншин И.В. 153   | <b>Е</b>              | Любин А.Д. 107         |
| Акопов А.С. 43   | Егоров В.С. 153       | Любовский А.М. 53      |
| <b>Б</b>   | Ерофеев П.Д. 114      | <b>М</b>               |
| Бабинцев А.В. 128  | <b>Ж</b>              | Маланов А.А. 112       |
| Байда Ю.В. 80  | Железов Р.В. 72       | Матюхевич С.Н. 153     |
| Бегунов Д.И. 131   | <b>З</b>              | Махнырь К.А. 125       |
| Бекларян Л.А. 43   | Завражных Д.А. 49     | Мясников Д.В. 68       |
| Беляев М.Г. 101, 107, 109                                | Загоруйко С.Н. 51     | Мясникова Н.В. 10      |
| Беляков К.О. 142   | Закиров М.Э. 81       | <b>Н</b>               |
| Бзыта В.И. 153   | Зверков О.А. 118      | Назаренко А.П. 137     |
| Боев С.Ф. 4  | Зенов А.Ю. 10         | Нарыжный И.Г. 74       |
| Бурнаев Е.В. 101, 103, 105, 107, 109, 110, 112, 114, 116 | <b>И</b>              | Нгуен Х.Ч. 95          |
| <b>В</b>   | Исаев М.В. 12         | Недбайло Ю.А. 17       |
| Варюхин Е.Г. 153   | <b>К</b>              | <b>О</b>               |
| Васильев А.В. 58   | Карпова М.А. 133, 151 | Орлов И.Ю. 70          |
| Владимиров С.М. 155                                      | Кожин А.С. 14         | Отачкин А.Е. 139       |
| <b>Г</b>   | Королькова А.В. 55    | <b>П</b>               |
| Габидулин Э.М. 158                                       | Красников С.А. 53     | Панов М.Е. 105         |
| Гурьянов Е.Г. 109  | Крохалев Д.И. 153     | Пантюхин Д.В. 51       |
| <b>Д</b>   | <b>Л</b>              | Пересторонин Н.О. 122  |
| Давидюк Д.С. 61  | Леченко А.В. 84       | Петров И.А. 18         |
| Домунян А.А. 45  | Лихачев В.В. 120      | Петроченков М.В. 20    |
| Дубровин Е.А. 153  | Лутохин А.С. 135, 143 | Петрыкин Д.А. 23       |
|  |                       | Петушков И.В. 26       |

Пилипчук Н.И. 158	Сысоев И.Ю. 162
Преображенский Н.Б. 36	
Приходько П.В. 101, 110, 116	
<b>Р</b>	
Речистов Г.С. 85	
Рогов А.С. 27	
Румянцев Л.А. 88	
Рыжов М.П. 30	
<b>С</b>	
Сарьян В.К. 137, 142, 143	
Сахно С.В. 145	
Селиверстов А.В. 118, 123	
Сергийчук М.Н. 45	
Симоненко И.В. 125	
Смехов Д.Г. 31	
Софронов А.Ю. 160	
Ступин Д.Д. 4	
Сущенко Н.А. 135, 143	
	<b>Т</b>
	Тимин Л.С. 33
	Титов А.Ю. 72
	<b>У</b>
	Украинцев К.Ю. 164
	Украинцев Ю.Д. 164
	Уривский А.В. 166
	Усачев А.С. 125
	Устюгов Д.С. 91
	<b>Ф</b>
	Фёдоров А.В. 35
	<b>Х</b>
	Хатько Е.Е. 92
	Хлынов А.А. 146
	Холопов Ю.А. 95

<b>Ч</b>
Чан Х.В. 36
Черноиванов А.И. 55
<b>Ш</b>
Швец Е.А. 160
Шевцов А.В. 74
Шерстнёв А.Е. 40
Шимко О.В. 98
Шишкин А.Л. 150, 151
Шкорута А.О. 77
<b>Щ</b>
Щелкунов Н.Н. 164
<b>Ю</b>
Юдин А.В. 78
<b>Я</b>
Янович Ю.А. 103
Яроцкий Д.А. 122

## Содержание

<b>Пленарное заседание</b> . . . . .	<b>4</b>
<i>Боев С.Ф., Ступин Д.Д.</i> Дальняя радиолокация: состояние, проблемы и перспективы . . . . .	4
<b>Секция высокопроизводительных вычислительных систем</b> . . . . .	<b>10</b>
<i>Зенов А.Ю., Мясникова Н.В.</i> Времяимпульсная модуляция для решения задач вычисления спектральных характеристик сигнала . . . . .	10
<i>Исаев М.В.</i> Основные тенденции в архитектуре высокопроизводительных многоядерных процессоров . . . . .	12
<i>Кожин А.С.</i> Аппаратная поддержка виртуализации вычислительных ресурсов (аналитический обзор) . . . . .	14
<i>Недбайло Ю.А.</i> Особенности реализации поддержки когерентности кэшей в системах на кристалле «Эльбрус-S» и «Эльбрус-2S» . . . . .	17
<i>Петров И.А.</i> Разработка кэша справочника для вычислительного комплекса на базе микропроцессора «Эльбрус-2S» . . . . .	18
<i>Петроченков М.В.</i> Инициализация регистров конфигурации в многокластерной системе «Эльбрус-S» . . . . .	20
<i>Петрыкин Д.А.</i> Коммутатор когерентных запросов и ответов системы на кристалле «Эльбрус-2S» . . . . .	23
<i>Петушков И.В.</i> Исследование методов оптимизации автоматического распараллеливания программ для гетерогенной многоядерной архитектуры CELL / BE . . . . .	26
<i>Рогов А.С.</i> Адаптация буферизующего коммутатора данных системы на кристалле . . . . .	27
<i>Рыжов М.П.</i> Система верификации модулей микропроцессора, управляемая тестовым покрытием . . . . .	30
<i>Смехов Д.Г.</i> Контроллер DMA для шины PCI Express . . . . .	31
<i>Тимин Л.С.</i> Моделирование неисправной работы встроенной памяти микропроцессора . . . . .	33

<i>Фёдоров А.В.</i> Разработка библиотеки нитей POSIX реального времени.....	35
<i>Чан Х.В., Преображенский Н.Б.</i> Аппаратная реализация десятичной арифметики с плавающей запятой.....	36
<i>Шерстнёв А.Е.</i> Аппаратное определение трассы доступа в оперативную память на ВК «Эльбрус-3М1».....	40

### Секция интеллектуальных информационных систем и технологий..... 43

<i>Акопов А.С., Бекларян Л.А.</i> Организация вычислительных процедур для сложных управляемых систем.....	43
<i>Домулян А.А., Сергейчук М.Н.</i> Кортексный сканер.....	45
<i>Завражнов Д.А.</i> Использование виртуальной машины в среде Linux.....	49
<i>Загоруйко С.Н., Пантюхин Д.В.</i> Структура памяти нейронной сети. Алгоритм прямого обучения.....	51
<i>Красников С.А., Любовский А.М.</i> Принципы построения экспертных систем экспресс-идентификации и контроля углеводородных соединений на основе спектрального анализа.....	53
<i>Черноиванов А.И., Королькова А.В.</i> Модель процесса передачи с регулированием по алгоритму типа RED динамической интенсивности потока. Сравнительный анализ для случаев TCP-Reno и TCP-NewReno трафика.....	55

### Секция инфокоммуникационных систем и сетей..... 58

<i>Васильев А.В.</i> Решение задачи оптимизации краткосрочного расписания с применением генетических алгоритмов.....	58
<i>Давидюк Д.С.</i> Спектральный метод анализа электроэнцефалограмм.....	61
<i>Дугин А.О.</i> Практические аспекты управления инфраструктурой сетевого анализа.....	66
<i>Мясников Д.В.</i> Анализ трудоемкости и производительности подходов к хранению данных на основе метамодели.....	68

<i>Орлов И.Ю.</i> Двусторонний подход к понятию надежности интернет-ресурсов и методам ее повышения.....	70
<i>Титов А.Ю., Железов Р.В.</i> Разработка эффективного алгоритма кэширования запросов к провайдерам данных для системы «Маршруты» с целью повышения качества обслуживания пользователей.....	72
<i>Шевцов А.В., Нарыжный И.Г.</i> Key-Value системы и их применение к моделям с наследованием структуры данных.....	74
<i>Шкорута А.О.</i> Генетический алгоритм в задаче многоступенчатой идентификации систем.....	77
<i>Юдин А.В.</i> Применение адаптивного фильтра Калмана для аппроксимации рассинхронизованных линейных систем.....	78

### Секция микропроцессорных технологий..... 80

<i>Байда Ю.В.</i> Программно-аппаратный симулятор процессора с векторным счетчиком инструкций на базе программируемых логических интегральных схем.....	80
<i>Закиров М.Э.</i> Один подход к решению проблемы взаимоблокировок для архитектуры с распределенными вычислениями.....	81
<i>Леченко А.В.</i> Использование архитектурного симулятора для тестирования формального описания цифровой логики микропроцессора.....	84
<i>Речистов Г.С.</i> Методики измерения скорости эмуляции при использовании динамического двоичного транслятора.....	85
<i>Румянцев Л.А.</i> Использование постоянной и «вращающейся» регистровых баз для организации микропоточного исполнения.....	88
<i>Устюгов Д.С.</i> Высокопроизводительный инструкционный кэш для современной многопоточковой архитектуры.....	91
<i>Хатько Е.Е.</i> Один способ реализации алгоритма генерации тестов в тестировании на основе моделей.....	92
<i>Холопов Ю.А., Нгуен Х.Ч.</i> Тракт модуля ввода-вывода быстрого контура регулирования.....	95

*Шимко О.В.* Система для анализа микроархитектурного критического пути исполнения программ в потактовой модели современного высокопроизводительного микропроцессора ..... 98

### Секция проблем передачи и обработки информации ..... 101

*Беляев М.Г., Бурнаев Е.В., Приходько П.В.* Методика построения аппроксимации многомерной функции на основе разложения по словарю параметрических функций ..... 101

*Бурнаев Е.В., Янович Ю.А.* Построение гладких суррогатных моделей ..... 103

*Бурнаев Е.В., Панов М.Е.* Об оценивании точности суррогатных моделей ..... 105

*Бурнаев Е.В., Беляев М.Г., Любин А.Д.* Аппроксимация многомерных зависимостей на основе разложения по словарю радиальных базисных функций ..... 107

*Бурнаев Е.В., Гурьянов Е.Г., Беляев М.Г.* О детерминированном алгоритме перекрёстной проверки в задаче аппроксимации ..... 109

*Бурнаев Е.В., Приходько П.В.* Интеграция методов снижения размерности в процедуру построения аппроксимации многомерной зависимости ..... 110

*Бурнаев Е.В., Маланов А.А.* Об автоматизации разведочного анализа источников данных ..... 112

*Бурнаев Е.В., Ерофеев П.Д.* Методы инициализации нелинейных регрессионных моделей ..... 114

*Бурнаев Е.В., Приходько П.В.* Методология построения суррогатных моделей ..... 116

*Зверков О.А., Селиверстов А.В., Любецкий В.А.* Об одном алгоритме кластеризации белков ..... 118

*Лизачев В.В.* Структурирование геоинформационных данных методами кластерного анализа ..... 120

*Пересторонин Н.О., Яроцкий Д.А.* Тестирование алгоритмов многокритериальной оптимизации ..... 122

*Селиверстов А.В., Любецкий В.А.* О функции Гильберта множества вершин куба ..... 123

*Симоненко И.В., Мажнырь К.А., Усачев А.С.* Быстродействующая лазерная видеокамера для видеосъемки сверхъярких объектов ..... 125

### Секция радио и информационных технологий ..... 128

*Бабинцев А.В.* Оценка отношения сигнал–интерференция в сотовых геостационарных спутниковых системах связи с многократным использованием полос частот ..... 128

*Бегунов Д.И.* Способ оптимизации хранения и использования информации в базах данных ..... 131

*Карпова М.А.* Расчет потерь в цифровом спутниковом канале передачи данных при линейных искажениях на борту космического аппарата ..... 133

*Лутохин А.С., Сущенко Н.А.* Система индивидуального оповещения абонентов о чрезвычайных ситуациях ..... 135

*Назаренко А.П., Сарьян В.К.* Теория инфокоммуникационного взаимодействия человеко-машинных объектов и окружающей среды в условиях возникновения чрезвычайных ситуаций техногенного характера ..... 137

*Отачкин А.Е.* Структурная схема скремблера системы условного доступа «Роскрипт» ..... 139

*Сарьян В.К., Беляков К.О.* Выявление типовых процессов на базе данных автоматизированной медицинской системы «Элекард–Мед» ..... 142

*Сарьян В.К., Лутохин А.С., Сущенко Н.А.* Новая область применения беспроводных сенсорных сетей ..... 143

*Сахно С.В.* Пути повышения устойчивости систем спутниковой связи и вещания ..... 145

*Хлынов А.А.* Исследование принципов реализации турбо-кодека ..... 146

*Шишкин А.Л.* Преимущества восьмипозиционной квадратурной амплитудной модуляции при малых значениях соотношения сигнал / шум ..... 150

*Шишкин А.Л., Карпова М.А.* Валидация модели демодулятора цифрового спутникового сигнала ..... 151

## Секция радиотехники и защиты информации . . . . . 153

<i>Акиншин И.В., Бзыта В.И., Варюхин Е.Г., Дубровин Е.А., Егоров В.С., Крохалев Д.И., Матюхевич С.Н.</i> Методы и средства испытаний крупногабаритных образцов вооружения и военной техники на действие электромагнитных полей радиотехнических средств . . . . .	153
<i>Владимиров С.М.</i> Новый итеративный алгоритм декодирования кодов с малой плотностью проверок на чётность в сетевом кодировании для двоичных каналов со стиранием на основе message-passing-алгоритма . . . . .	155
<i>Пилипчук Н.И., Габидулин Э.М.</i> Итеративное декодирование многокомпонентных кодов . . . . .	158
<i>Софронов А.Ю., Швец Е.А.</i> Проектирование и исследование функций, улучшающих статистические свойства псевдослучайных последовательностей . . . . .	160
<i>Сысоев И.Ю.</i> Вычисление синдрома при декодировании рангового кода, построенного на слабо самоортогональном базисе . . . . .	162
<i>Украинцев Ю.Д., Украинцев К.Ю., Щелкунов Н.Н.</i> Методы непараметрической идентификации плотности распределения вероятностей мгновенных значений сигналов и помех, наблюдаемых на входе радиоприемного устройства . . . . .	164
<i>Уривский А.В.</i> Об исправлении ошибок в штриховых кодах . . . . .	166
<hr/>	
Список представленных организаций . . . . .	168
Именной указатель . . . . .	170

## ТРУДЫ 53-й НАУЧНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ МФТИ

### Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук

#### Часть I Радиотехника и кибернетика

#### Том 1

Составитель: *Русскин С.О.*

Редакторы:

*В.А. Дружинина, И.А. Волкова, О.П. Котова, Л.В. Себова*  
Компьютерная вёрстка: *А.В. Чудновский*

Корректоры:

*Е.Ю. Чиркина, А.О. Кулагина, В.Ю. Арзамасов, Д.М. Мазилкин,*  
*И.А. Смоленцев, Ю.А. Мардашова*

Издательская группа:

*Э.Г. Кюн, Е.А. Аникиужкина, Г.М. Голубева, И.Н. Самохвалова*

Подписано в печать 12.11.2010. Формат 60 × 84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.

Усл. печ. л. 11,1. Уч.-изд. л. 10,9. Тираж 100 экз. Заказ № 49

ГОУ ВПО «Московский физико-технический институт  
(государственный университет)»

Издательский сектор оперативной полиграфии  
141700, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9