

# ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

3(163)  
2010

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Издается с ноября 1995 г.

УЧРЕДИТЕЛЬ

Издательство "Новые технологии"

## СОДЕРЖАНИЕ

### ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

- Антонченков А. А. Задачи трехмерной визуализации в ГИС и программный прототип для их решения . . . . . 2  
Бобков В. А., Морозов М. А. Векторизация фотоизображений городских сцен для 3D-реконструкции . . . . . 5  
Бушмелева К. И., Плюснин И. И., Увайсов С. У. Модель мобильного устройства дистанционного зондирования магистрального газопровода . . . . . 11

### СЕТИ И СИСТЕМЫ СВЯЗИ

- Грушин А. И., Ростовцев А. В., Чинь Куанг Киен. Упаковка и распаковка потоков данных для системы ГЛОНАСС . . . . . 15  
Алиев И. М. Управление трафиком в транзитных BGP/MPLS-сетях . . . . . 19  
Шахов В. Г., Коваленко О. Н. Модель распределения пропускной способности каналов мультисервисной сети между потоками с различными параметрами качества обслуживания . . . . . 23

### КОМПЬЮТЕРНАЯ ГРАФИКА, ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ

- Медведева Е. В. Нелинейная фильтрация статистически связанных видеопоследовательностей цифровых полутоновых изображений . . . . . 27  
Копцов А. А., Пронкин Ю. Н. Об одном новом методе обнаружения объектов . . . . . 33

### НЕЙРОСЕТИ

- Жернаков С. В. Идентификация характеристик ГТД на основе технологии нейронных сетей. . . . . 39

### ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МЕДИЦИНЕ

- Гоменюк С. М., Емельянов А. О., Карпенко А. П., Чернецов С. А. Обзор методов и систем прогнозирования оптимальных доз инсулина для больных сахарным диабетом I типа . . . . . 48  
Острейковский В. А., Дрожжин Е. В., Федоров Д. А. О формализации предметной области интеллектуальной информационной системы поддержки принятия решений врачом . . . . . 58  
Токмачев М. С., Рязанцев П. П. Формирование персонализированной базы данных и программная реализация исследования здоровья населения региона . . . . . 64

### ПРИКЛАДНЫЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

- Домников П. А. Распараллеливание задач конечно-элементного моделирования трехмерных магнитотеллурических полей . . . . . 69  
Девятьяров Д. А. Нечеткие дескрипторы молекул в задаче "структура—свойство" . . . . . 73  
Силина А. Ю., Гермашев И. В., Васильева В. Д., Дербисер В. Е. Комплексная оценка научной деятельности. . . . . 75  
Contents . . . . . 78  
Приложение. Шилов В. В. От Гомера до Чапека. Краткая история механических автоматов

Главный редактор  
НОРЕНКОВ И. П.

Зам. гл. редактора  
ФИЛИМОНОВ Н. Б.

Редакционная  
коллегия:

- АВДОШИН С. М.  
АНТОНОВ Б. И.  
БАТИЩЕВ Д. И.  
БАРСКИЙ А. Б.  
БОЖКО А. Н.  
ВАСЕНИН В. А.  
ГАЛУШКИН А. И.  
ГЛОРИОЗОВ Е. Л.  
ГОРБАТОВ В. А.  
ДОМРАЧЕВ В. Г.  
ЗАГИДУЛЛИН Р. Ш.  
ЗАРУБИН В. С.  
ИВАННИКОВ А. Д.  
ИСАЕНКО Р. О.  
КОЛИН К. К.  
КУЛАГИН В. П.  
КУРЕЙЧИК В. М.  
ЛЬВОВИЧ Я. Е.  
МАЛЬЦЕВ П. П.  
МЕДВЕДЕВ Н. В.  
МИХАЙЛОВ Б. М.  
НАРИНЬЯНИ А. С.  
НЕЧАЕВ В. В.  
ПАВЛОВ В. В.  
ПУЗАНКОВ Д. В.  
РЯБОВ Г. Г.  
СОКОЛОВ Б. В.  
СТЕМПКОВСКИЙ А. Л.  
УСКОВ В. Л.  
ЧЕРМОШЕНЦЕВ С. Ф.  
ШИЛОВ В. В.

Редакция:

- БЕЗМЕНОВА М. Ю.  
ГРИГОРИН-РЯБОВА Е. В.  
ЛЫСЕНКО А. В.  
ЧУГУНОВА А. В.

Информация о журнале доступна по сети Internet по адресу <http://www.informika.ru/text/magaz/it/> или <http://novtex.ru/IT>.

Журнал включен в систему Российского индекса научного цитирования.

Журнал входит в Перечень научных журналов, в которых по рекомендации ВАК РФ должны быть опубликованы научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук.

УДК 004.925

**А. А. Антонченков**, аспирант,  
"МАТИ"—РГТУ им. К. Э. Циолковского,  
e-mail: A.A.Antonchenkov@gmail.com

## Задачи трехмерной визуализации в ГИС и программный прототип для их решения

*Рассмотрена задача создания систем, предназначенных для быстрого построения трехмерного изображения геологических моделей в ГИС. Предложен комплексный подход к ее решению, основанный на использовании аппаратного ускорения и применении современных алгоритмов оптимизации формирования трехмерного изображения, реализованный в виде программного прототипа.*

**Ключевые слова:** ГИС, трехмерная графика, аппаратное ускорение, библиотека OpenGL, алгоритмы оптимизации, отсечение перекрывающихся поверхностей

### Трехмерная визуализация в ГИС

Трехмерное компьютерное моделирование позволяет создать визуальный образ изучаемого объекта — трехмерную модель. Модель дает возможность исследователям наглядно представить объект и оценить его структурные особенности. На модели проводятся анализ и изучение свойств объекта, часть которых проще воспринимается именно в виде визуального образа, чем в виде схем и таблиц данных. Таким образом, трехмерная модель — наглядное и удобное средство изучения и анализа свойств объектов.

ГИС относятся к области исследований, в которой трехмерное компьютерное моделирование является особенно важным инструментом. Большинство задач ГИС связаны с изучением и анализом объектов, которые невозможно наблюдать непосредственно. В основном это обусловлено размерами и расположением объектов исследования (слои почвы, геологические структуры, залежи полезных ископаемых и т. п.). Например, физические размеры пласта полезных ископаемых могут достигать десятков километров, а число контрольных точек, в которых проводятся измерения, может исчисляться тысячами. При моделировании на основе массива контрольных точек строится визуальный образ объекта, по которому

делаются выводы об особенностях строения и расположения объекта (рис. 1, см. третью сторону обложки).

Основными недостатками существующих систем, таких как продукты семейства ArcView компании ESRI, являются низкая наглядность модели и высокие системные требования [1, 2]. Высокие системные требования приводят к резкому снижению скорости работы системы на маломощных машинах, что особенно сильно сказывается на работе подсистемы визуализации, которая подразумевает интерактивный режим взаимодействия с пользователем. Эта проблема особенно остро встает при визуализации больших моделей, содержащих сотни тысяч и миллионы контрольных точек. Недостаточная наглядность обуславливается схематичностью представления модели, при которой каждая контрольная точка отображается геометрической точкой в трехмерном пространстве. Такое представление ухудшает восприятие объекта как единого целого и затрудняет работу с большими моделями, содержащими множество объектов. Точки объектов сливаются и визуально перемешиваются, что затрудняет восприятие формы и взаимного расположения объектов (рис. 2, см. третью сторону обложки).

Кроме того, подавляющее большинство ГИС, обладающих возможностью трехмерной визуализации, предназначены для исследований в области добычи нефти. Их функционал оказывается недостаточным для нужд исследований, связанных с добычей газа и угля. Например, для анализа моделей газоносных и угольных месторождений необходимо иметь возможность в реальном времени с высокой точностью строить вертикальные сечения (рис. 3, см. третью сторону обложки). Подобные задачи можно решить путем создания специализированных программных комплексов, позволяющих расширить функциональность имеющихся ГИС.

### Методы реализации трехмерной графики, их преимущества и недостатки

Существует множество способов реализации трехмерной компьютерной графики, которые могут быть разделены по способу построения трехмерного пространства на два класса. К первому относятся приемы, основанные на программной реализации математического аппарата построе-

ния трехмерного изображения на экране (к этому классу можно отнести продукты семейства ArcView компании ESRI). Ко второму относятся приемы, использующие для построения трехмерного изображения аппаратные средства (к ним можно отнести продукты компании ROXAR, например IRAP RMS [3]). Подходы каждого из этих классов имеют свои достоинства и недостатки, которые следует рассмотреть подробнее.

К достоинствам приемов *первого класса* можно отнести следующие особенности:

- математический аппарат построения трехмерного изображения полностью реализуется работчиками системы. Специалисты выбирают подходящую модель проекции пространства, параметры камеры, модель освещения, алгоритмы расчета параметров точек пространства и способ построения конечного изображения;
- есть возможность выбрать оптимальные для конечного решения значения параметров и алгоритмы реализации;
- существует возможность в ходе разработки сравнивать разные решения и заменять выбранные модели и алгоритмы альтернативными;
- реализуется только строго определенный набор функций и возможностей, оптимальный для системы, что снижает избыточность.

К недостаткам подходов этого класса можно отнести:

- большую трудоемкость разработки вследствие необходимости самостоятельно разработать весь математический аппарат построения трехмерного пространства и его проекции в двухмерное изображение;
- высокие требования к вычислительной мощности центрального процессора системы и объему оперативной памяти. Это обусловлено тем, что все вычисления, связанные с построением трехмерного изображения, выполняются на центральном процессоре (ЦП), что влечет постоянную высокую загрузку ЦП и вытеснение других полезных вычислений;
- слабые возможности по расширению системы новыми средствами отображения, которые не закладывались в ней изначально, так как для них, как правило, требуются коренные изменения в базовых модулях системы.

К достоинствам подходов *второго класса* относятся:

- наличие готовых решений для создания трехмерного изображения в виде библиотек, не требующих какой-либо дополнительной разработки;
- возможность в большинстве случаев получить более высокую производительность.

К недостаткам методов этого класса можно отнести:

- ограниченный набор инструментов и средств отображения, определяемый авторами библиотеки. Однако следует подчеркнуть, что эти библиотеки предоставляют широкие возможности по комбинированию инструментов и методов для достижения требуемых результатов;
- необходимость изучения инструментов и средств отображения, предоставляемых библиотекой (ее программного API), и способов их применения;
- необходимость использовать библиотеку, исходный код которой в большинстве случаев является закрытым и недоступен для свободного ознакомления и повторного использования;
- необходимость наличия соответствующего аппаратного обеспечения — видеокарты или видеоускорителя.

### **Применение алгоритмов оптимизации построения трехмерного изображения**

Более современными и перспективными являются подходы, основанные на применении аппаратного ускорения. По сравнению с аппаратными реализациями оно позволяет получить значительный прирост производительности систем трехмерной визуализации в ГИС. Однако использование возможностей аппаратного ускорения не полностью решает задачу получения удовлетворительно быстрого действия в силу большого размера моделей (больших объемов данных для визуализации).

Для получения необходимого быстрого действия системы визуализации необходимо применить алгоритмы оптимизации процесса построения трехмерного изображения (адаптировать существующие или разработать новые алгоритмы). Основными задачами этих алгоритмов являются сокращение количества данных и использование быстрых методов вывода. В частности, одним из наиболее эффективных приемов сокращения количества данных является расчет перекрытия поверхностей модели и отсечение невидимых в текущий момент времени частей. Подобные алгоритмы следует строить с учетом специфики модели: чем более плотно расположены объекты в модели, тем большая часть их поверхностей загораживают друг друга от взгляда пользователя. Быстрые методы вывода обеспечивают библиотеки за счет аппаратной поддержки, однако они требуют определенной организации данных, что накладывает некоторые ограничения.

### **Требования к программным решениям**

Существующие решения обладают рядом недостатков:

- высокие системные требования к рабочей станции;

- низкая наглядность модели;
- низкая производительность;
- отсутствие возможности создавать вертикальные сечения в реальном времени.

Система, создаваемая для решения специфических задач повышения наглядности трехмерной модели и построения вертикальных сечений модели, должна соответствовать следующим требованиям:

- наглядность и точность трехмерной модели;
- интерактивный режим работы;
- высокая производительность подсистемы визуализации для достижения удовлетворительной скорости работы (20 кадров в секунду) при отображении больших моделей (более 1 млн точек);
- умеренные системные требования, предполагающие возможность установки прототипа на персональные компьютеры и ноутбуки среднего уровня;
- возможность построения вертикальных сечений по произвольно заданным точкам с отображением плоскости сечения непосредственно на модели.

### Описание прототипа

Для удовлетворения сформулированных выше требований и решения задачи создания прототипа следует использовать реализацию на основе аппаратного ускорения трехмерной графики как наиболее быстрого на сегодняшний день способа построения изображения. Такой выбор позволяет получить эффективное, гибкое и перспективное решение, подтверждающее целесообразность использования современных технологий создания трехмерных изображений в ГИС.

В качестве основы трехмерного вывода в прототипе используется бесплатно распространяемая библиотека OpenGL [4]. От других решений ее отличают кроссплатформенность и поддержка производителями аппаратных средств. Эта библиотека позволяет прототипу удовлетворять требованиям наглядности модели, так как она дает возможность строить даже фотореалистичные изображения.

Основная задача достижения высокой производительности графического ядра прототипа решается применением комплексного подхода к оптимизации построения трехмерного изображения. Это решение включает в себя применение наиболее производительных из представленных в библиотеке и поддерживаемых на аппаратном уровне способов вывода точек модели на экран в сочетании с применением набора алгоритмов оптимизации. Этот набор состоит из нескольких ал-

горитмов, применяемых к модели в следующем порядке:

- адаптированный алгоритм отсечения пирамидой вида [5];
- алгоритм разбиения модели на пространственные сегменты;
- алгоритм отсечения перекрывающихся сегментов [6];
- алгоритм отсечения перекрывающихся поверхностей внутри сегментов.

При создании набора оптимизаций отдельным требованием является сохранение структуры исходных данных в виде, пригодном для решения задачи построения вертикальных сечений [7, 8]. Соблюдение этого требования позволяет не дублировать данные для построения изображения и расчета вертикальных сечений. Это экономит память и делает решение гибким, позволяя добавлять в прототип новую функциональность, к которой также будут применимы имеющиеся алгоритмы оптимизации.

Благодаря сохранению структуры исходных данных удалось создать точный и эффективный математический аппарат построения вертикальных сечений модели, который способен строить сложные сечения по произвольно заданным точкам. Время построения даже сложного сечения большой модели не превышает нескольких секунд, что позволяет работать с данной функциональностью прототипа в интерактивном режиме.

Описание математического аппарата, алгоритмов оптимизации и их взаимодействия планируется дать в отдельной статье.

Прототип представляет собой приложение для операционной системы Microsoft Windows, не требующее дополнительных библиотек, удобное для установки и распространения, способное работать на персональных компьютерах и ноутбуках среднего уровня. Пользователю предоставляется стандартный оконный интерфейс.

Функциональные возможности прототипа:

- создание проекта (набора пластов), загрузка, изменение и сохранение проекта;
- настройка параметров отображения пластов, просмотр их физических параметров;
- визуализация набора пластов с возможностью отображения отдельных пластов или всего набора одновременно (рис. 4, см. четвертую сторону обложки);
- свободное перемещение положения пользователя в пространстве модели и изменение угла обзора модели;
- построение вертикальных сечений и отображение результатов в пространстве модели и отображение плоскости сечения в отдельном окне (рис. 5, см. четвертую сторону обложки).

## Заключение

Использование современных и перспективных методов построения трехмерного изображения в совокупности с адаптацией и разработкой новых алгоритмов оптимизации позволили создать программный прототип с невысокими системными требованиями, который способен эффективно решать поставленные задачи. По ряду характеристик прототип превосходит имеющиеся на рынке системы визуализации для данных ГИС.

### Список литературы

1. **Официальный** сайт компании ESRI [Электронный ресурс] // < <http://www.esri.com/> > (24.02.2008).

2. **Официальный** сайт компании DATA+ [Электронный ресурс] // < <http://www.dataplus.ru/> > (24.02.2008).

3. **Официальный** сайт компании Roxar [Электронный ресурс] // < <http://www.roxar.ru/> > (24.02.2008).

4. **Краснов М.** OpenGL графика в проектах Delphi. СПб.: БХВ-Петербург, 2004. 352 с.

5. **Sykora D., Jelinek J.** Efficient View Frustum Culling [Электронный ресурс] // Home page of the Central European Seminar on Computer Graphics (CESCG) < <http://www.cescg.org/CESCG-2002/DSykoraJJelinek/index.html> > (24.02.2008).

6. **Effective** Occlusion Culling for the Interactive Display of Arbitrary Models [Электронный ресурс] // Department of Computer Science, UNC-Chapel Hill < <http://www.cs.unc.edu/~zhangh/hom.html> > (24.02.2008).

7. **Александреску А.** Современное проектирование на C++ / Пер. с англ. М.: Издательский дом "Вильямс", 2008. 336 с.

8. **Гамма Э., Хелм Р., Джонсон Р., Влссидес Дж.** Приемы объектно-ориентированного проектирования. Паттерны проектирования. СПб.: Питер, 2008. 336 с.

УДК 004.932.2

**В. А. Бобков**, д-р техн. наук, зав. лаб.,  
**М. А. Морозов**, вед. инж.-программист,  
Институт автоматизации  
и процессов управления ДВО РАН,  
e-mail: bobkov@iacp.dvo.ru

## Векторизация фотоизображений городских сцен для 3D-реконструкции

*Предложен подход к векторизации изображений применительно к задаче реконструкции сцен городской обстановки по последовательности фотоизображений, основанный на комбинированном применении детектора границ Саппу и процедуры построения пиксельного остова с последующей векторизацией. Особенность подхода заключается в разработке дополнительных средств обработки данных, направленных на повышение качества векторизации и отвечающих двум различным по требованиям режимам векторизации в контексте вышеупомянутого приложения. Представлены два реализующих подход алгоритма векторизации — для детектирования линий, используемых в задаче калибровки камер и для построения векторной основы в задаче 3D-реконструкции объектов городской застройки.*

**Ключевые слова:** детектирование границ изображений, векторизация, 3D-реконструкция, калибровка камеры

### Введение

Задача векторизации фотоизображений является важным этапом в процессе 3D-реконструкции объемных сцен, так как служит средством выделения линий, описывающих ребра объектов. Ребра составляют каркас объекта, и, таким

образом, качественное детектирование и стыковка этих линий позволят реконструировать 3-мерный объект. Кроме того, даже отдельные ребра можно использовать для внешней калибровки камер, т. е. определения их взаимной ориентации и положения в единой системе координат. Такая методика калибровки основывается на вычислении на изображении вида сцены так называемой *vanishing points* (точки схода семейства линий, соответствующих одному направлению в пространстве) [1].

Определение на каждом из нескольких видов трех *vanishing points*, отвечающих трем взаимно ортогональным направлениям в сцене (используется ориентация ребер одного или нескольких одинаково ориентированных зданий), позволяет решить задачу калибровки камер. Поэтому необходима качественная векторизация фотоизображений, позволяющая определять *vanishing points* с высокой точностью.

Как правило, на изображении ребрам соответствуют участки с сильным градиентом интенсивности. Для векторизации необходимо преобразовать исходное изображение таким образом, чтобы были выделены все эти участки. Для этого используются детекторы границ. Существует множество подходов к детектированию границ, например, в работе [2] упоминается 22 новых алгоритма детектирования, предложенных в четырех журналах с 1992 по 1998 годы. Детекторы границ обычно работают по одной и той же схеме: сглаживание изображения, подчеркивание (усиление) перепадов, пороговый фильтр, прослеживание границы. Сравнение детекторов — задача непростая, так как трудно сформулировать критерии и

создать корректную методику сравнения. Отчасти эти трудности можно объяснить различием настроечных параметров у разных методов. Авторы работы [2] сделали ряд сравнений детекторов для различных применений, которые показали, что *Canny*-детектор [3], как правило, наиболее подходящий выбор по качеству результатов, быстродействию и низкой чувствительности к изменчивости параметров.

В работе [4], посвященной калибровке камер, векторизация используется как способ получения калибровочных линий. Подход основан на использовании детектора границ *Canny* с последующим выделением линий, описанным в работе [5].

В работе [6] рассматривается проблема восстановления контуров зданий по спутниковым изображениям и аэрофотоснимкам с помощью преобразования Хафа. Также в работе [7] предлагается полуавтоматический алгоритм, комбинирующий преобразование Хафа и вычисление выпуклого полигона, включающего проекцию здания (вид сверху). В работах отмечается, с одной стороны, высокая помехоустойчивость преобразования Хафа, а с другой стороны, подверженность ошибкам вследствие теневых контуров. Впрочем наличие контуров, порожденных тенью, не всегда является помехой к распознаванию. Иногда наличие тени позволяет получить дополнительную информацию. Например, в работе [8] для восстановления высоты зданий по одиночному спутниковому изображению используется тень, отбрасываемая объектом.

Существуют также методы выделения контуров, не требующие детектирования границ [9, 10]. В статье [9] описан подход к выделению контуров зданий на спутниковых изображениях высокого разрешения с помощью модели "активного контура", предложенной в работе [10]. Контур строит из специально заданных "точек роста", распределенных по изображению равномерно. Из каждой точки роста "выращивается" контур региона, удовлетворяющий заданным критериям однородности пикселей локальной окрестности. Такой подход удобнее использовать, прежде всего, в сочетании с интерактивным заданием областей интереса, так как в автоматическом режиме возникает сильная зависимость от способа распределения точек роста.

Векторизация является промежуточным этапом для решения задач 3D-реконструкции по изображениям. В общей схеме реконструкции она является поставщиком линий для калибровки камеры или контуров целых "самостоятельных" объектов, либо контуров отдельных элементов этих объектов. Анализ структуры сцены и принадлежности контуров — это задача алгоритмов более высокой иерархии в процессе реконструкции. В ра-

боте [11] предложен подход к созданию анализатора сцен городской застройки на основе классификатора свойств геометрических объектов [12]. Авторы исследуют набор геометрических свойств регионов, выделенных путем сегментации и векторизации изображения. Результаты анализа сильно зависят от качества векторизации.

В данной работе также предлагается подход к векторизации изображений, ориентированный на применение в задаче 3D-реконструкции городской застройки по последовательности фотоизображений. Подход основывается на комбинированном применении детектора границ *Canny* и процедуры построения пиксельного остова с последующей его векторизацией. Его новизна состоит в разработке дополнительных методов коррекции результатов векторизации, направленных на повышение качества и отвечающих двум различным по требованиям режимам векторизации в контексте вышеупомянутого приложения. Подход реализуется в виде двух специализированных алгоритмов, имеющих общую основу. Первый алгоритм предназначен для получения векторных линий субпиксельной точности при решении задачи калибровки камер, второй алгоритм описывает возможный способ получения топологически корректного описания каркаса зданий. Далее статья организована следующим образом: в разделе "Векторизация" изложен общий подход к векторизации фотоизображений применительно к рассматриваемому приложению; в разделе "Алгоритм векторизации для калибровки камеры" описан подход к получению калибровочных линий; в разделе "Алгоритм векторизации для 3D-реконструкции" описаны процедуры топологической коррекции результатов векторизации в целях восстановления каркаса зданий.

## Векторизация

В данной работе мы ограничимся рассмотрением алгоритмов векторизации, ориентированных только на использование в задаче 3D-реконструкции, в которой основными объектами моделирования являются здания. Прежде всего, нас интересуют линии, ограничивающие стены и углы зданий, т. е. ребра твердотельных объектов. Варианты, когда сооружение не имеет прямых линий, здесь не рассматриваются. Наряду с ребрами на изображениях детектируются множество линий, которые могут относиться к другим объектам или элементам сцены. Это могут быть элементы ландшафта или городской инфраструктуры, не имеющие определенной формы, а также объекты, попадающие в кадр только частично. Кроме ребер есть еще линии, порождаемые преломлением/отражением света, и границы тени.

Также следует упомянуть линии, являющиеся производными от текстуры поверхности или окраски.

Векторизация проводится для двойной цели: во-первых, для калибровки камеры, во-вторых, для обнаружения ребер объектов. Для калибровки требуется наличие достаточного числа длинных линий, построенных с высокой точностью, желательно субпиксельной. Точность построения линий существенно влияет на качество калибровки.

Для ребер требования по точности не столь критичны, здесь на передний план выходят требования к целостности линий, поскольку наличие разрывов и нестыковок сильно затрудняет восстановление геометрии и в отдельных случаях делает это невозможным. Таким образом, если для калибровки достаточно обнаружить и векторизовать хотя бы часть конструктивной линии, то для второй задачи требуется некоторая дополнительная коррекция.

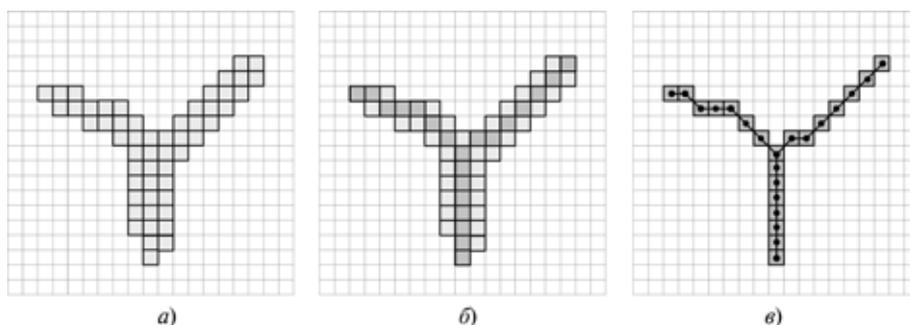
Для выделения контуров на фотографических изображениях сцен городской застройки разработан подход к векторизации, включающий следующие этапы:

- детектирование перепадов (границ) растрового изображения;
- элементарная векторизация границ — описание контуров цепным кодом;
- коррекция и отбор полученных линий.

Первые два этапа являются общими для решения двух упомянутых задач, третий этап имеет специфические отличия в зависимости от решаемой задачи и будет рассматриваться в соответствующих разделах.

Детектирование границ растровых изображений выполняется хорошо известным методом *Canny* [3]. Для более точного выделения границ на цветных изображениях в реализации *Canny*-детектора вместо полутонового градиента используется цветовой градиент [13, с. 498]. Работа детектора управляется с помощью трех параметров. Ключевой параметр, определяющий контраст выделяемых границ, — верхний порог гистерезисного фильтра. От этого же параметра сильно зависит количество найденных границ. На выходе детектора мы получаем бинарное (двухцветное) изображение граница—фон.

Переход к векторному представлению границ осуществляется методом построения остова с последующей векторизацией [14]. Основные этапы векторизации показаны на рис. 1. На этом этапе проявляются проблемы качества детектирования



**Рис. 1. Основные этапы векторизации:**  
*a* — исходное растровое изображение; *б* — построение остова; *в* — элементарная векторизация — описание контуров цепным кодом

границ, так как дефекты границ приводят к разрывам, ложным тупиковым ответвлениям, нечетким углам и локальным искажениям направления. Кроме того, существует ряд негативных эффектов, обусловленных несовершенством аппаратуры: геометрические искажения оптики фотокамеры; шумы сенсорной матрицы; хроматические аберрации; недостаток разрешения для передачи формы мелких или удаленных объектов. Также можно упомянуть искажения, вносимые компрессией JPEG с потерями.

#### Алгоритм векторизации для калибровки камеры

С учетом сформулированных выше требований предлагаемый алгоритм векторизации состоит из следующих этапов.

1. Детектирование перепадов методом *Canny* — получение бинарного изображения перепад/фон.

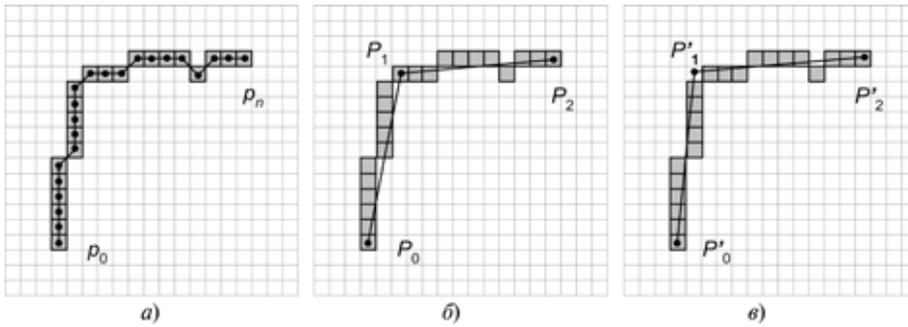
2. Векторизация результатов детектирования перепадов — на выходе получаем описание контуров в виде цепного кода.

3. Коррекция и отбор полученных линий.

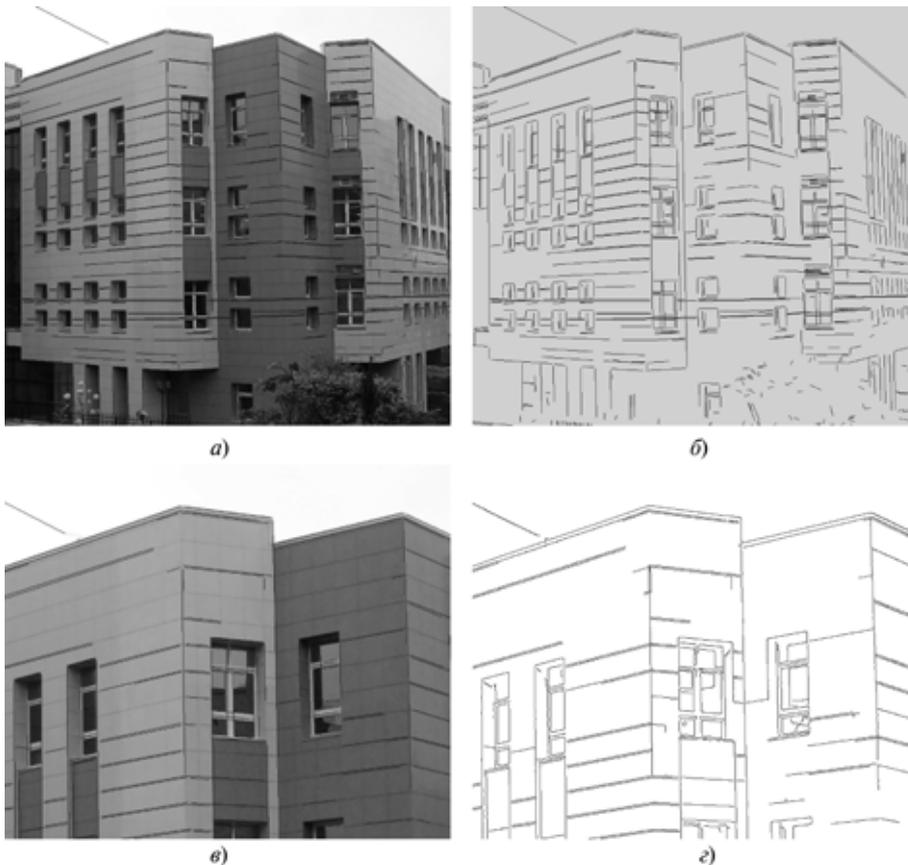
3.1. Преобразование контуров из цепного кода в набор отрезков путем аппроксимации методом наименьших квадратов с заданной погрешностью. При этом одному контуру может соответствовать несколько отрезков.

3.2. Отбор значимых отрезков — по длине.

Первые два этапа описаны в предыдущем разделе. Здесь мы рассмотрим процедуру аппроксимации векторов методом наименьших квадратов (МНК). Задача аппроксимации векторов возникает вследствие дискретной природы линии остова. Существуют различные алгоритмы аппроксимации контуров, суть которых сводится к отбору из всех точек остова подмножества значимых точек, удовлетворяющих какому-либо критерию [15, 16]. Отбор должен происходить таким образом, чтобы значимые точки сохраняли описание формы контура. В задаче построения векторов для калибровки камеры такой подход дает неудовлетворительные результаты. Поэтому была разработана про-



**Рис. 2. Аппроксимация векторов:**  
 а — исходный контур  $\{p_i\}$ ; б — предварительная аппроксимация контура путем отбора значимых точек  $\{P_k\}$ ; в — коррекция положения значимых точек контура с помощью аппроксимации МНК  $\{P'_k\}$



**Рис. 3. Векторизация для калибровки камеры:**  
 а — исходное изображение с наложением калибровочных векторов; б — калибровочные векторы отдельно; в — увеличенный фрагмент; г — результат работы детектора Canny для фрагмента

остава  $\{p_{ik}\}$  и для него строится линейная аппроксимация  $\{L_k\}$  по МНК. Вычислив точки пересечения смежных прямых  $L_k$  и  $L_{k+1}$ , получим уточненный контур  $\{P'_k\}$ . На рис. 2 проиллюстрирован результат отбора значимых точек  $\{P_k\}$  из множества всех точек контура  $\{p_i\}$  и результат уточнения значимых точек методом МНК  $\{P'_k\}$ .

Заключительным этапом данного алгоритма является отбор значимых отрезков по длине. Отсечение мелких отрезков (ниже заданного порога) положительно влияет на точность калибровки камеры. На рис. 3 проиллюстрированы результаты векторизации и промежуточный этап работы детектора Canny.

### Алгоритм векторизации для 3D-реконструкции

Цель этого вида векторизации заключается в получении линий, описывающих геометрию объектов сцены, т. е. они должны соответствовать ребрам этих объектов. В то же время на изображении после обработки детектором границ мы получаем множество линий, которые либо не соответствуют объектам нашего интереса, либо являются неконструктивными — линии тени и текстуры. Разделение линий на классы по принадлежности к ребрам, теням, текстурам и т. п. лежит за рамками данной работы. Задача векторизации сводится лишь к созданию векторной основы для восстановления 3D-сцены. Кроме этого на векторные данные налагают дополнительные требования, в отличие от ли-

цедура коррекции положения значимых точек методом наименьших квадратов. Процедура делится на два этапа: на первом этапе отбираются значимые точки как в классическом алгоритме Дугласа—Пекера [15], на втором этапе уточняется местоположение значимых точек.

На первом этапе из множества всех точек контура  $\{p_i\}$  строится подмножество значимых точек  $\{P_k\}$ . На втором этапе для каждого отрезка  $(P_k, P_{k+1})$  берется соответствующее ему подмножество точек

ний, используемых для калибровки камеры. Если от линий для калибровки требуется максимальная точность положения и направления, то ребра 3D-объектов должны обладать максимальной полнотой, т. е. не содержать разрывов и должны быть корректно состыкованы с соседними ребрами в углах объектов. Следует заметить, что работа детектора на углах объектов не идеальна, зачастую именно там возникают разрывы контура. Особый

интерес для 3D-реконструкции представляют углы, где сходятся три плоскости (стенки) объекта, в этом случае детектор, как правило, делает разрыв линии. Это связано с трудностью построения градиента в месте схождения трех линий.

Схема алгоритма векторизации для 3D-реконструкции.

1. Детектирование перепадов (границ) растрового изображения.
2. Элементарная векторизация границ — описание контуров цепным кодом.
3. Коррекция и отбор полученных линий:
  - 3.1. Аппроксимация цепного кода отбором значимых точек.
  - 3.2. Восполнение разрывов.
  - 3.3. Восполнение (стыковка) углов.
  - 3.4. Удаление контуров, имеющих длину ниже заданного порога.

Первые два этапа — общие для всех алгоритмов. Этап аппроксимации (3.1) отличается от аналогичного в предыдущем алгоритме и выполняется как проиллюстрировано на рис. 2, б, т. е. простым отбором значимых точек, без аппроксимации МНК. Это упрощение связано с тем, что для реконструкции не требуется субпиксельная точность, а также тем, что МНК порождает некоторое рассогласование линий в местах стыковки контуров.

Чтобы скорректировать дефекты, возникающие еще на этапе обнаружения перепадов, алгоритм содержит дополнительные этапы обработки (3.2—3.4).

Восполнение разрывов проводится путем анализа окрестностей контуров. Для всех контуров  $\{L_i\}$  составляется список свободных концов  $\{E_i\}$ . Окрестности свободных концов анализируются на предмет возможности соединения. Область поиска ограничивается (рис. 4) следующими величинами:

- максимальным значением восполняемого разрыва  $d_{\max}$ ;
- сектором, заданным углом  $\alpha_{\max}$ ;
- минимально допустимым углом между векторами.

Составляется множество пар концов — кандидатов на объединение  $\{E_i, E_j\}$ . Так как для одного конца может существовать несколько вариантов объединения, удовлетворяющих поисковой процедуре, то каждой кандидатной паре ставится в соответствие тройка  $\{E_i, E_j, T_{ij}\}$ , где  $T_{ij}$  — оценка качества потенциального соединения. Вычисляется эта величина по формуле

$$T_{ij} = (1 - \max(\alpha_{ij}, \alpha_{ji})/\alpha_{\max})(1 - d_{ij}/d_{\max}),$$

где  $\alpha_{ij}, \alpha_{ji}$  — направления от  $i$ -го конца на  $j$ -й и наоборот;  $d_{ij}$  — расстояние между концами.

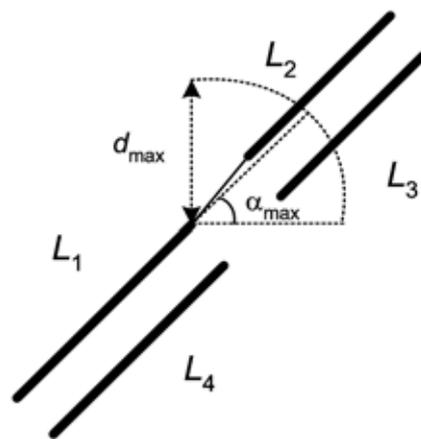


Рис. 4. Восполнение разрывов

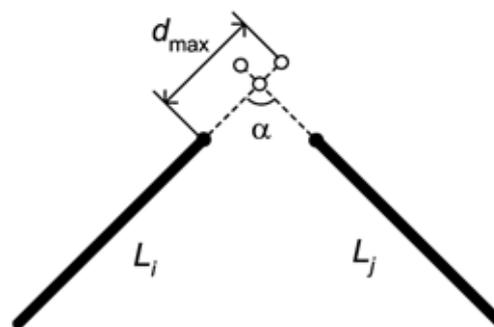


Рис. 5. Коррекция углов

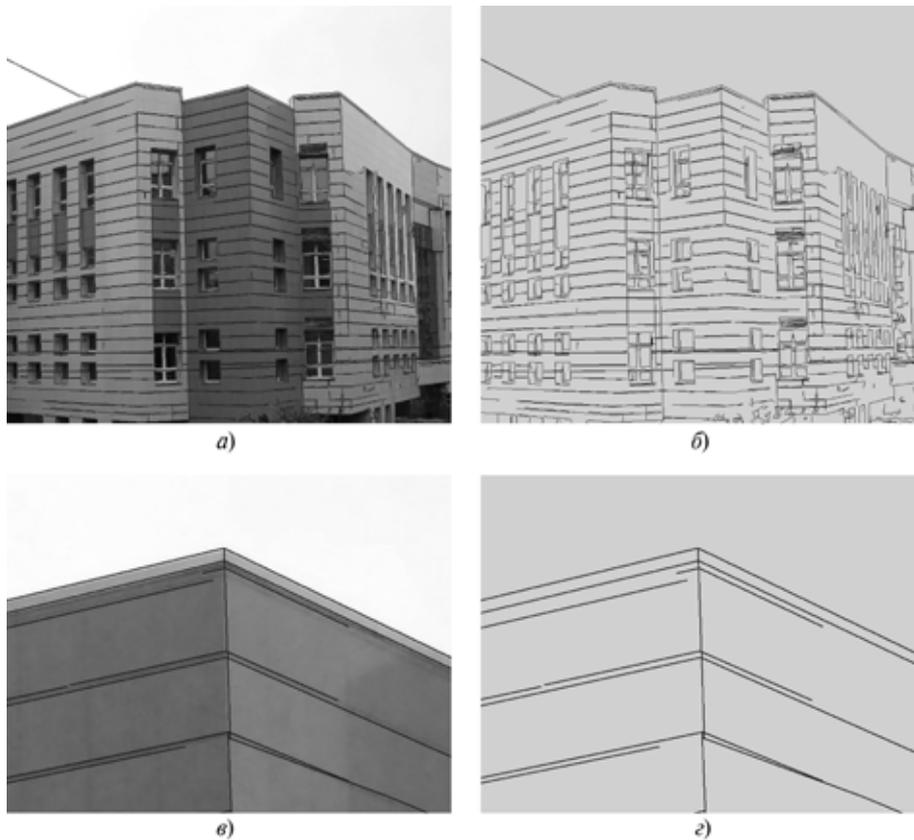
Процесс итеративный, в начале каждой итерации строятся оценки вероятности соединения, потом происходит сортировка по убыванию вероятности и соединение наилучших пар. Итерации проводятся до тех пор, пока существует непустое множество пар — кандидатов на объединение.

Для стыковки углов к концам каждого контура строится геометрическое дополнение — отрезок длиной  $d_{\max}$ . На множестве геометрических дополнений вычисляются точки пересечения отрезков (рис. 5). Проблема состоит в том, что один отрезок-дополнение может пересекаться одновременно с несколькими другими. Поэтому приходится отбирать один вариант из множества по критерию максимального удаления точки пересечения от обоих концов. Стыковка углов также регулируется ограничением на значение угла  $\alpha_{\min} \leq \alpha \leq \alpha_{\max}$  между отрезками.

Удаление мелких контуров позволяет очистить полученную векторизацию от избыточного числа мелких деталей, как правило, не принадлежащих к протяженным ребрам зданий.

## Результаты экспериментов

Эффективность разработанной программы векторизации оценивалась в двух вышеупомяну-



**Рис. 6. Векторизация для 3D-реконструкции:**

*a* — фотоизображение здания с наложением векторов; *б* — векторы отдельно; *в* — увеличенный фрагмент здания с наложением векторов; *г* — векторы отдельно

тых режимах ее работы — для калибровки камер и для целей построения 3D-моделей городских сцен. В режиме калибровки камер сформированное множество линий обрабатывалось согласно применяемой технологии [17] с помощью RANSAC-метода для выделения трех семейств параллельных линий, соответствующих трем взаимно ортогональным направлениям в сцене (ориентация мировой системы координат). Получаемая в итоге внешняя калибровка камер (положение и взаимная ориентация камер) применяется на последующих этапах технологии реконструкции для сопоставления линий на видах с восстановлением их пространственных координат. Многочисленные вычислительные эксперименты для разных сцен показали, что наилучшая достигаемая точность калибровки находится в пределах 2–5 пикселей при ширине изображения в 3000 пикселей. Под точностью здесь понимается отклонение эпиполярных линий от контрольных точек-особенностей на изображении. Указанные значения точности являются достаточными в рамках применяемой технологии реконструкции.

Качество векторизации для целей реконструкции оценивалось как непосредственно, визуально, так и косвенным образом на этапе сопостав-

ления линий на изображениях разных видов. На рис. 6 приведен пример векторизации изображения здания. В отличие от векторизации для калибровки здесь алгоритм содержит дополнительные этапы обработки — восполнение разрывов линий и стыковка углов. Визуально можно наблюдать хорошее совпадение локализации полученных векторов с границами объектов. Косвенная оценка качества векторизации заключалась в подсчете числа сопоставленных отрезков (по отношению к потенциально возможному) и доли недостоверных сопоставлений. На ряде экспериментов с разными сценами количество сопоставленных отрезков колебалось от 40 до 70 % с достоверностью от 5 до 30 %. Такую эффективность пока нельзя считать приемлемой для целей автоматизированной обработки, поэтому при практическом применении результатов алгоритмической векторизации на данном этапе работы используется интерактивная доработка, которая повышает качество векторизации до приемлемого уровня.

Были также проведены замеры быстродействия предлагаемых алгоритмов на ряде фотоизображений сцен городской застройки. Растровые изображения размером  $3872 \times 2592$  в режиме получения линий для калибровки камер обрабатываются за время 10...12 с (около 1000 линий), в режиме реконструкции 15...25 с (свыше 2000 линий). Время обработки зависит от количества и протяженности границ перепадов на изображении. Конфигурация компьютера: Intel Core2Duo E4400@2500MHz RAM 2Gb.

## Выводы

Предложенный подход дает достаточно качественные линии для калибровки камеры. Результаты, полученные для 3D-реконструкции, требуют незначительной ручной доработки и могут быть использованы для восстановления 3D-объектов. Дальнейший прогресс в целях построения полностью автоматической процедуры обработки возможен при продвижении по трем направлениям: совершенствование детектирования границ; использование изображений с нескольких ракурсов для совместного выделения границ и развитие

подходов к семантическому анализу структуры и иерархии объектов сцены.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект " 08-07-00113-а).*

#### Список литературы

1. **Caprile B., Torre V.** Using vanishing points for camera calibration // International Journal of Computer Vision. 1990. N 3. P. 127—140.
2. **Shin M. C., Goldgof D., Bowyer K. W.** An objective comparison methodology of edge detection algorithms using a structure from motion task // IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 1998.
3. **Canny J.** A computational approach to edge detection. Pattern Analysis and Machine Intergence // IEEE Transactions on, PAMI-8(6)/ Nov. 1986. P. 679—698.
4. **ZuWhan Kim.** Geometry of vanishing points and its application to external calibration and realtime pose estimation. Research Reports. Pater UCB-ITS-RR-2006-5. Institute of Transportation Studies. 2006. July 1. URL: <http://repositories.cdlib.org/its/reports/UCB-ITS-RR-2006-5>.
5. **Guru D. S., Shekar B. H., Nagabhushan P.** A simple and robust line detection algorithm based on small eigenvalue analysis // Pattern Recognition Letters. 2004. N 26 (1). P. 1—13.
6. **Vozikis G., Jansa J.** Advantages and disadvantage of the hough transformation in the frame of futomated building extraction // The International archives of the photogrammetry. Remote sensing and spatial information sciences. Beijing. 2008. Vol. XXXVII. Part B3b. P. 719.
7. **Cui S. Y., Yan Q., Liu Z. J., Li M.** Building detection and extraction by machine learning / The international archives of the photogrammetry. Remote sensing and spatial information sciences. Beijing. 2008. Vol. XXXVII. Part B3b. P. 411.
8. **Huang X. J., Kwoh L. K.** Monoplotting — a semi-automated Approach for 3D reconstruction from Single satellite image // The International archives of the photogrammetry. Remote sensing and spatial information sciences. Beijing. 2008. Vol. XXXVII. Part B3b. P. 453.
9. **Ahmady S., Ebadi H., Zouj M. J. V., Moghaddam H. A.** Automatic building extraction from high resolution satellite images using active contour mode // The International archives of the photogrammetry. Remote sensing and spatial information sciences. Beijing. 2008. Vol. XXXVII. Part B3b. P. 453.
10. **Chan T. F., Vese L. A.** Active contours without edges // Image Processing, IEEE Transacions. Feb. 2001. Vol. 10. Is. 2. P. 266—277.
11. **Drauschke M., Förstner W.** Selecting appropriate features for detecting buildings and building parts // The International archives of the photogrammetry. Remote sensing and spatial information sciences. Beijing. 2008. Vol. XXXVII Part B3b. P. 447.
12. **Schapire R. E., Singer Y.** Improved boosting algorithms using confidence-rated predictions // Machine Learning. 1999. N 37 (3). P. 297—336.
13. **Гонсалес П., Вудс Р.** Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2005.
14. **Wang P. S. P., Zhang Y. Y.** A Fast and Flexible Thinning Algorithm // IEEE Transactions on computers. May 1989. Vol. 38. N 5. P. 471—475.
15. **Douglas D., Peucker T.** Algorithms for the reduction of the number of points required to represent a digitized line or its caricature // The Canadian Cartographer. 1973. N 10 (2). P. 112—122.
16. **Hershberger J., Snoeyink J.** Speeding Up the Douglas-Peucker Line-Simplification Algorithm // Proc. 5th symp. on data handling. 1992. P. 134—143.
17. **Бобков В. А., Роньшин Ю. И., Кудряшов А. П.** Калибровка изображений городской обстановки // Информационные технологии и вычислительные системы. 2009. № 1. С. 72—83.

УДК 621.396.96.623:619.71

**К. И. Бушмелева**, канд. физ.-мат. наук, доц., e-mail: [bklya@yandex.ru](mailto:bklya@yandex.ru),

**И. И. Плюснин**, директор Центра лазерных технологий, Сургутский государственный университет,  
**С. У. Увайсов**, д-р техн. наук, проф., Московский государственный институт электроники и математики

## Модель мобильного устройства дистанционного зондирования магистрального газопровода

*В рамках метода дистанционного зондирования разработана математическая модель устройства — локатора, позволяющего проводить диагностику технического состояния линейной части магистрального газопровода посредством лазерного зондирования подстилающей поверхности с борта летательного аппарата.*

**Ключевые слова:** математическая модель, диагностика, магистральный газопровод, лазерный локатор, коэффициент отражения, подстилающая поверхность, система автоматического управления

### Введение

Предложенная в данной работе математическая модель (ММ) устройства дистанционного зондирования позволяет исследовать влияние коэффициента отражения (КО) и вектора коэффициента рассеяния (ВКР) подстилающей поверхности на структуру локатора, а также решает проблемы регулировки и настройки устройства, применяемого для мониторинга технического состояния ли-

нейной части магистрального газопровода. Под КО понимается отношение отраженной в единице телесного угла мощности оптического сигнала к падающей на подстилающую поверхность мощности оптического сигнала. Знание такого параметра для реальных поверхностей, имеющих в той или иной мере как зеркальное, так и диффузное отражение, необходимо для разработки основных узлов локатора с улучшенными технико-эконо-

мическими и эксплуатационными характеристиками, а также для контроля загазованности метаном атмосферы вблизи газопровода. В работах [1—3, 5] по исследованию различных сторон диффузного отражения показана сложность этого явления для реальных поверхностей.

### Математическая модель системы зондирования

В работах [2, 3, 6] по теории радиолокации получены выражения, связывающие мощности излученного и отраженного сигналов. Авторами настоящей статьи установлено, что при мощности излучения от 10 до 15 мВт, существующей апертуре приемного зеркала диаметром 300 мм и высоте полета вертолета 80 м, мощность отраженного сигнала, попадающего на фотоприемник, лежит в пределах  $0,1...1 \cdot 10^{-9}$  Вт в зависимости от значения КО земной поверхности  $k_2 = 0,1...1$ .

Мощность отраженного сигнала рассчитывалась с учетом коэффициента усиления оптической системы ( $10^4$ ) локации для газового лазера:

$$P = \frac{P_0 A T^2(R)}{R^2} (k_1 + k_2), \quad (1)$$

где  $P$  — принимаемая мощность отраженного сигнала;  $P_0$  — мощность зондирующего излучения;  $A$  — площадь приемного зеркала;  $R$  — расстояние от локатора до поверхности Земли;  $T(R)$  — прозрачность слоя атмосферы протяженностью  $R$ ;  $k_1$  — коэффициент поглощения атмосферы на трассе луча длиной  $2R$ ;  $k_2$  — коэффициент отражения исследуемой поверхности. В результате получена система следующих уравнений:

$$k_1 = \frac{b_1}{f_{cx} d} - \Delta_1; \quad (2)$$

$$k_2 = \frac{b_x}{f_{cx} d} - k_i; \quad (3)$$

$$f_{cx} = \frac{b_1 - b_2}{d(\Delta_1 - \Delta_2)}, \quad (4)$$

где  $b_1, b_2, b_x$  — отношения отраженного и опорного сигналов для первой и второй эталонных мишеней и исследуемой поверхности соответственно;  $\Delta_1, \Delta_2$  — коэффициенты отражения эталонных мишеней;  $f_{cx}$  — коэффициент, зависящий от параметров локационного устройства;  $d = AT^2(Z)/Z^2$  — коэффициент ослабления излучения в метановом облаке.

Из выражений (2—4) видно, что, для того чтобы получить информацию о коэффициенте отражения исследуемой поверхности  $k_2$ , необходимо

сначала на одном и том же расстоянии провести калибровку локатора по двум эталонным мишеням, определив  $f_{cx}$ , а затем на требуемых расстояниях с помощью одного эталона определить  $k_2$ .

Прозрачность слоя атмосферы  $T(R)$ , входящая в  $d$ , определяется по известной формуле

$$T(R) = \exp(-0,782 R/S_m), \quad (5)$$

где  $0,782R/S_m$  — коэффициент ослабления дымкой в приземном слое атмосферы для длины волны  $\lambda = 3,39$  мкм;  $S_m$  — метеорологическая дальность видения.

В лабораторных условиях, когда прозрачность атмосферы не меняется, величиной  $k_1$  можно пренебречь. Тогда уравнение (3) можно упростить, и оно примет вид

$$k_2 = \frac{b_x}{f_{cx} d} = \frac{b_x}{\varphi_k}, \quad (6)$$

где  $\varphi_k$  — калибровочный коэффициент, определяемый соотношением

$$\varphi_k = \frac{b_1}{\Delta_1}. \quad (7)$$

В процессе эксперимента за эталон была выбрана поверхность листа ватмана, для которого коэффициент диффузного отражения  $\Delta_1 = 0,25 \text{ ср}^{-1}$ .

В качестве образцов подстилающих поверхностей использовались различные природные образования (обнажения, почвы, растительный покров, снег, вода), а также строительные материалы (асфальт, кирпич, бетон). В целях исследования зависимости отраженной способности подстилающих поверхностей от направления зондирования были измерены коэффициенты отражения при различных углах падения  $\varphi$  излучения на поверхность. Измерение  $\varphi$  достигалось поворотом кюветы с образцом на углы от  $0$  до  $90^\circ$  относительно вертикали.

Результаты измерения коэффициентов отражения подстилающих поверхностей трех классов природных образований, а также некоторых строительных материалов представлены в таблице.

Из таблицы видно, что коэффициенты отражения поверхностей класса I имеют слабую зависимость от угла  $\varphi$ , что объясняется диффузностью рассеяния излучения от этих поверхностей. Зависимость коэффициентов отражения травы и кроны деревьев (класс II) от угла имеют различный характер. Коэффициент отражения от кроны деревьев почти не зависит от  $\varphi$ , тогда как коэффициент отражения травы убывает с увеличением  $\varphi$  от  $0$  до  $60^\circ$ , а затем возрастает. Это возрастание коэффициента отражения с увеличением угла  $\varphi$  обусловлено зеркальностью отражения, вызывае-

Значения коэффициентов отражения подстилающих поверхностей,  $\text{ср}^{-1}$  ( $\lambda = 3,39 \text{ мкм}$ )

$\varphi, ^\circ$	Класс I				Класс II		Класс III		Строительные материалы		
	чернозем	глина	песок	щебенка	травя	крона деревьев	снег	вода	бетон	асфальт	кирпич
0					0,046	0,027			0,121	0,201	0,085
5						0,025				0,188	0,084
10	0,035		0,044		0,063	0,027			0,417	0,188	0,081
15	0,040		0,043		0,053	0,031	0,140		0,135	0,176	0,067
20	0,039		0,044		0,040	0,025	0,146		0,137	0,170	0,078
25	0,037		0,043		0,040	0,025	0,131		0,144	0,162	0,082
30	0,039	0,062	0,045		0,038	0,023	0,117		0,153	0,159	0,076
35	0,038	0,064	0,044		0,037	0,026	0,105		0,139	0,148	0,074
40	0,036	0,075	0,044	0,028	0,032	0,029	0,092		0,128	0,146	0,073
45	0,039	0,078	0,046	0,028	0,027	0,030	0,096		0,130	0,142	0,067
50	0,043	0,073	0,048	0,021	0,025	0,031	0,076		0,135	0,149	0,069
55	0,035	0,076	0,045	0,027	0,025	0,028	0,067		0,133	0,135	0,063
60	0,039	0,082	0,045	0,028	0,017	0,028	0,051		0,111	0,131	0,056
65	0,030	0,077	0,049	0,032	0,022	0,025	0,051		0,103	0,122	0,050
70	0,033	0,082	0,051	0,034	0,026	0,026	0,048		0,103	0,122	0,050
75	0,032	0,077	0,052	0,033	0,033	0,024	0,048	0,0025	0,096	0,128	0,043
80		0,077	0,052	0,038						0,117	

мого отдельными элементами поверхности, обладающими зеркальностью, при определенных углах падения излучения. У снегового покрова коэффициент отражения убывает с увеличением угла  $\varphi$ , что является проявлением зеркальности отражения.

Значения коэффициентов отражения бетона, асфальта, кирпича различны между собой, однако для всех них характерно заметное уменьшение коэффициента отражения с увеличением угла  $\varphi$ , связанное с преобладанием зеркального отражения от этих поверхностей.

Таким образом, измерения зависимостей коэффициента отражения от направления зондирования показали, что чаще всего у подстилающих поверхностей наблюдается смешанное отражение, т. е. одновременно зеркальное и диффузное, причем в зависимости от структуры поверхности одно из них может преобладать над другим. Примерами поверхностей, имеющих значительное зеркальное отражение, могут служить снег, асфальт, кирпич. Такие образования, как чернозем, глина, являются примерами поверхности, приближающейся к диффузной.

Полученные результаты послужили исходными данными для разработки математической модели лазерного локатора по обнаружению утечек газа вблизи линейной части магистрального газопровода.

### Математическая модель локатора

Одной из проблем [4, 5, 7] настройки и юстировки лазерных локаторов, а также отработки новых технологических решений является сложность регулировки электронной части локатора, на которую влияют, в свою очередь, следующие факторы.

1. Наличие двух каналов ( $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ ).
2. Сложность математической модели.

На рис. 1 представлена структурная схема разработанной модели локатора в виде системы автоматического управления (САУ).

В данной схеме не учтено влияние вектора коэффициента рассеяния  $\bar{K}_p(t)$ , значение которого зависит от свойств подстилающей поверхности (почва, трава, песок и т. п.), изменения по време-

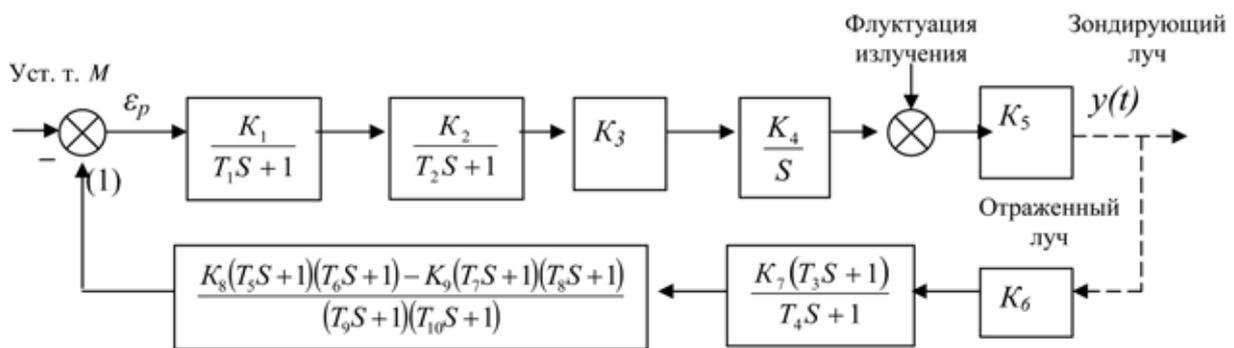


Рис. 1. Структурная схема модели САУ локатора

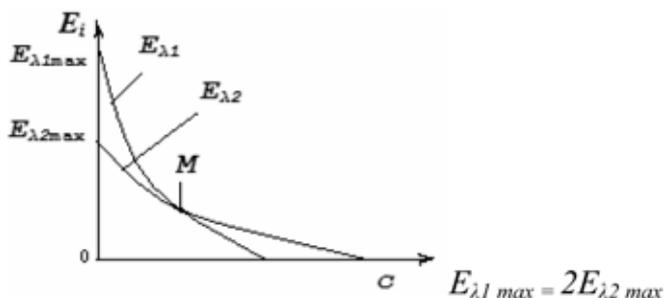


Рис. 2. Изменение интенсивности излучения лазеров на входе фотоприемника

ни (перемещения локатора) и влияние коэффициентов рассеяния каналов  $K_{\lambda_1}(t)$  и  $K_{\lambda_2}(t)$ .

3. Работа локатора в режиме системы автоматического регулирования с астатизмом первого порядка по каждому из каналов, сигналы управления которого подчиняются соотношениям

$$U_{\text{упр}}(\lambda_1) = U_{\text{упр}}(\lambda_1) + K_1 \int_{t_1}^{t_2} U_{\text{вых}} c_A(t) dt, \quad (8)$$

$$U_{\text{упр}}(\lambda_2) = U_{\text{упр}}(\lambda_2) - K_2 \int_{t_1}^{t_2} U_{\text{вых}} c_A(t) dt.$$

4. Необходимость оптимизации точности и чувствительности измерения разности сигналов  $U_{\text{упр}}(\lambda_1)$  и  $U_{\text{упр}}(\lambda_2)$  и времени интегрирования  $T_{\text{и}} = t_2 - t_1$  с учетом усредненного вектора коэффициента рассеяния  $\bar{K}_p$  подстилающей поверхности.

5. Нелинейная характеристика зависимости регулирования при обнаружении облака газа, которая в общем виде может быть представлена графически (рис. 2), здесь  $M$  — точка равенства интенсивности принимаемого излучения при определенной концентрации газа.

Мощность излучения лазеров на длинах волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  на входе фотоприемников излучения определяется из выражения

$$E_i = f(c), \quad (9)$$

где  $c$  — концентрация метана.

Однако излучения  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  лазеров имеют разную расходимость (фактически телесный угол), а также оба излучения сложно совместить, поэтому отраженные излучения каждого канала зависят от характера подстилающей поверхности и будут иметь разные значения  $K_{\lambda_1}(t)$  и  $K_{\lambda_2}(t)$  в один и тот же момент времени.

С учетом того, что значение средней мощности лазерного излучения, поступающего в приемник на длинах волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ , пропорционально амплиту-

де сигнала с фотоприемника  $P_i \equiv V_i$ , выражение (9) можно записать в следующем виде:

$$E_i = A \frac{(P_i + \delta P_i)}{R^2} \eta_{\text{пер}} e^{-K_n(\lambda)R} \times \exp(-2d_i c(R + \Delta R)) \int_{t_1}^{t_2} \bar{K}_p(t) dt, \quad (10)$$

где  $\delta P_i$  — флуктуация мощности;  $A$  — коэффициент преобразования оптического сигнала в электрический (одинаков для обоих каналов);  $d_i$  — коэффициенты ослабления излучения в метановом облаке на длинах волны  $\lambda_1$  ( $\alpha_1 = 1,5 \text{ атм}^{-1} \text{ см}^{-1}$ ) и  $\lambda_2$  ( $\alpha_2 = 9,8 \text{ атм}^{-1} \text{ см}^{-1}$ );  $R$  — высота зондирования;

$\Delta R$  — флуктуация  $R$ ;  $\int_{t_1}^{t_2} \bar{K}_p(t) dt$  — усредненный коэффициент рассеяния подстилающей поверхности  $K_{\lambda_1}(t)$  и  $K_{\lambda_2}(t)$ ;  $K_n(\lambda)$  — монохроматический коэффициент поглощения;  $\eta_{\text{пер}}$  — коэффициент пропускания оптической системы.

6. Наличие обратной связи, которая оценивает ошибку регулирования САУ в зависимости от  $\bar{K}_p(t)$  и  $c(t)$ , при этом исполнительный механизм формирует управление  $U(t)$ , обеспечивающее  $\varepsilon_p \rightarrow 0$ .

7. Большое число точек настройки параметров САУ локатора, влияющих на характеристики работы устройства.

В процессе анализа работы локатора были рассмотрены несколько способов моделирования с точки зрения реализации всего пространства целевой функции  $Q$ . При этом каждый способ базировался на ограничениях и реализовывал один параметр целевой функции (локальную целевую функцию  $Q_i$ ). В результате за основу моделирования приняты следующие локальные целевые функции:

- функция оптимального быстродействия  $Q_T$ ,

$$\text{где } Q_T = \int_{t_1}^{t_2} dt;$$

- функция некоррелированной центрированной случайной гауссовой последовательности  $Q_E$ :  $E[w[k]] = 0$ ,  $E[w[k]w[k-1]^T] = 0, 1 = 1, 2, 3$ , т. е. дискретный белый шум;
- функция экстремального регулирования  $Q_u = f(u)$  с вспомогательной модуляцией (синхронным детектированием);
- функция  $Q_u = U_0(t + \alpha \sin \omega t)$ , где  $\alpha$  и  $\omega$  — постоянные величины, составляющая  $\alpha \sin \omega t$  этой функции является поисковым сигналом и вырабатывается генератором, а составляющая  $U_0(t)$  есть рабочее движение;

- также перспективным является использование для оценки локатора методов и алгоритмов корреляционно-экстремальных систем, которые позволяют оценить все локальные целевые функции.

### Заключение

Таким образом, разработана математическая модель устройства дистанционного зондирования в виде системы автоматического управления с астатизмом 1-го порядка по каждому из двух каналов, учитывающая влияние вектора коэффициентов рассеяния от подстилающей поверхности, что позволяет решить проблему регулировки электронной части установки и осуществить ее настройку и юстировку непосредственно перед применением по назначению.

В настоящее время созданы различные варианты компьютерной модели электронной части лазерного локатора (расчета и моделирования) с использованием пакетов программного обеспечения (ППО) MathCad, MatLab и LabView. Выполнена структурная оценка САУ локатора (см. рис. 1) согласно передаточной функции с использовани-

ем ППО Classic. Проведены эксперименты по определению пределов регулирования параметров (регулируемых и стационарных) САУ локатора на стабилизацию локальных целевых функций  $Q_j$ .

### Список литературы

1. Белов М. Л., Городничев В. А. и др. Обработка сигналов в задачах лазерного газоанализа атмосферы // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2001. № 4. С. 51—57.
2. Борн М., Вольф Э. Основы оптики / Пер. с англ. С. Н. Бреуса. — Под ред. Г. П. Мотулевич. Изд. 2-е испр. М.: Наука, 1973. 719 с.
3. Ермаков Б. А. Оптико-электронные приборы с лазерами. Л.: ГОИ, 1982. 200 с.
4. Попов А. Н., Садчихин А. В. Поглощение излучений  $\lambda_1 = 3,3922$  и  $\lambda_2 = 3,912$  мкм в предельных углеводородах // Журнал прикладной спектроскопии. 1991. Т. 55, № 3. С. 58—62.
5. Табарин В. А., Плюснин И. И., Бушмелева К. И. Лазерный излучатель // Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления: Материалы XIV Науч.-техн. конференции "Датчик-2002". Судак, 2002. М.: МГИЭМ. С. 276—278.
6. Финкельштейн М. И. Основы радиолокации. СПб.: Питер, 1997. 295 с.
7. Plusnin I. I., Tabarin V. A., Kuzmichev V. D., Bushmeleva K. I. Polarized bistability in He-Ne laser operating  $\lambda = 3,39 \mu\text{m}$  using Zeeman effect // Proc. of the International Conference on Lasers 2001. Tucson, Arizona: STS Press. 2002. S. 493—495.

## СЕТИ И СИСТЕМЫ СВЯЗИ

УДК 004.31

А. И. Грушин, канд. техн. наук,  
А. В. Ростовцев, инж.-констр.,  
ИТМ и ВТ им. С. А. Лебедева РАН,  
e-mail: aigrushin@ipmce.ru,  
Чинь Куанг Киен, студент, МФТИ

### Упаковка и распаковка потоков данных для системы ГЛОНАСС

*В системе спутниковой навигации ГЛОНАСС используется микропроцессорная система на базе ядра NeuroMatrixS (NMC3) [1]. Для преобразования потоков данных в формат, удобный для обработки в NMC3 или для хранения в памяти, потоки данных в первом случае распаковываются, а во втором — упаковываются, это делает устройство упаковки/распаковки потоков данных PU (Permutation Unit).*

**Ключевые слова:** поток данных, упаковка, распаковка, матрица, ГЛОНАСС

#### Введение

В устройстве спутниковой навигации, рассчитанном на использование отечественной системы ГЛОНАСС (Глобальная навигационная спутниковая система), для обработки информации используется про-

цессорное ядро NMC3. Для преобразования потоков данных в формат, удобный для обработки в NMC3 или для хранения в памяти, потоки данных в первом случае распаковываются, а во втором — упаковываются. Этим занимается устройство упаковки/распаковки потоков данных PU (рис. 1, см. вторую сторону обложки). Использование PU позволяет резко повысить производительность NMC3 на таких задачах, как корреляция и фильтрация, при этом хранить коэффициенты для корреляции и фильтрации, а также результаты обработки в компактном виде.

Устройство выполняет распаковку и упаковку потоков данных, при этом элемент входных и выходных данных может иметь размер от 1 до 64 разрядов, результаты могут выдаваться, начиная как с младших элементов, так и со старших. Предусмотрено преобразование матрицы в вектор и распаковка вектора с преобразованием в матрицу. В устройстве формируются адреса для обращения в память для чтения данных и для записи результатов.

#### 1. Операции, выполняемые в устройстве PU

Устройство PU осуществляет следующие операции:

- упаковка с возможностью выбора любых необходимых разрядов внутри элемента отбрасыванием

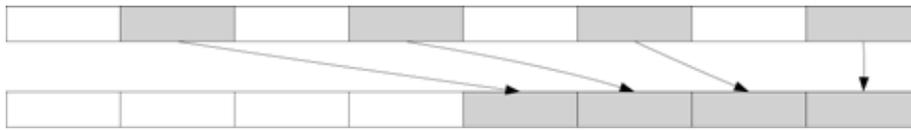


Рис. 2. Упаковка без насыщения ( $N = 16$ ,  $M = 8$ )



Рис. 3. Распаковка ( $N = 8$ ,  $M = 16$ )

Исходное слово	3	2	1	0
Диагональная матрица	0			
		1		
			2	
				3

Рис. 4. Получение диагональной матрицы

остальных; на рис. 2 изображен пример упаковки для входного элемента размером  $N = 16$  разрядов и выходного элемента  $M = 8$  разрядов;

- *распаковка*, на рис. 3 приведен пример распаковки для  $N = 8$ ,  $M = 16$ ;
- *получение диагональной матрицы*: из слова нужно получить матрицу, элементы исходного слова могут стоять как в главной, так и в побочной диагонали. На рис. 4 приведен пример для  $M = 16$ .

Устройство PU должно работать в одном из трех режимов:

- 1) получение данных из процессора и запись результата обработки в память;
- 2) получение данных из памяти и передача результата в процессор;
- 3) получение данных из процессора и передача результата в процессор.

Устройство PU должно формировать адреса для чтения данных из памяти или записи результата в память.

Устройство должно быть реализовано на библиотеке стандартных элементов с технологией 90 нм, размер PU  $\leq 50\,000$  вентиляей, рабочая частота при наихудших условиях 327,68 МГц. При распаковке PU должно каждый такт формировать одно выходное слово, при упаковке — каждый такт выполнять считывание одного слова.

## 2. Описание реализации устройства

На рис. 5 показана структура устройства, в него входят следующие узлы: входной буфер FIFO, узел входного выравнивания IA, узел конфигурационных регистров CTREG, узел формирования адреса ADDR\_GEN, функциональные узлы FU и узел центрального управления CCU.

На *конфигурационных регистрах* сохраняются необходимые параметры для выполнения команды и некоторые избыточные параметры. Они вычисляются программным способом один раз и используются все время обработки потока. Размер потока составляет до  $2^{32}$  64-разрядных слов, поэтому время вычисления параметров несущественно по сравнению со временем обработки потока. Вместе с тем, вычисление этих параметров уменьшает объем обо-

рудования и упрощает реализацию функциональных узлов. В начале операции конфигурационные данные приходят по шине PB\_IN[31:0], в зависимости от REG\_CODE[4:0] они записываются в один из 10 регистров.

Входной буфер FIFO предназначен для временного хранения входных данных. Данные могут прийти из памяти по шине MB\_IN[63:0] или из процессора NMC3 по шине SB\_IN[63:0], из буфера информация поступает в узел входного выравнивания. При проектировании буфера было учтено следующее: при чтении из памяти данные приходят не раньше, чем через 3 такта с момента выдачи адреса; устройство обязано принять значимые данные из памяти; при упаковке, если нет блокировок на входе и на выходе, каждый такт устройство должно принимать одно входное слово. Исходя из этих ограничений глубина буфера выбрана равной 5.

Узел ADDR\_GEN вычисляет адрес для обращения в память и формирует его значимость. Так как PU не может отказаться от приема данных, приходящих из памяти, то новый значимый адрес выставляется только тогда, когда в FIFO есть свободное место, т. е. регистр свободен и ранее не был выставлен адрес, данные по которому должны быть записаны в этот регистр.

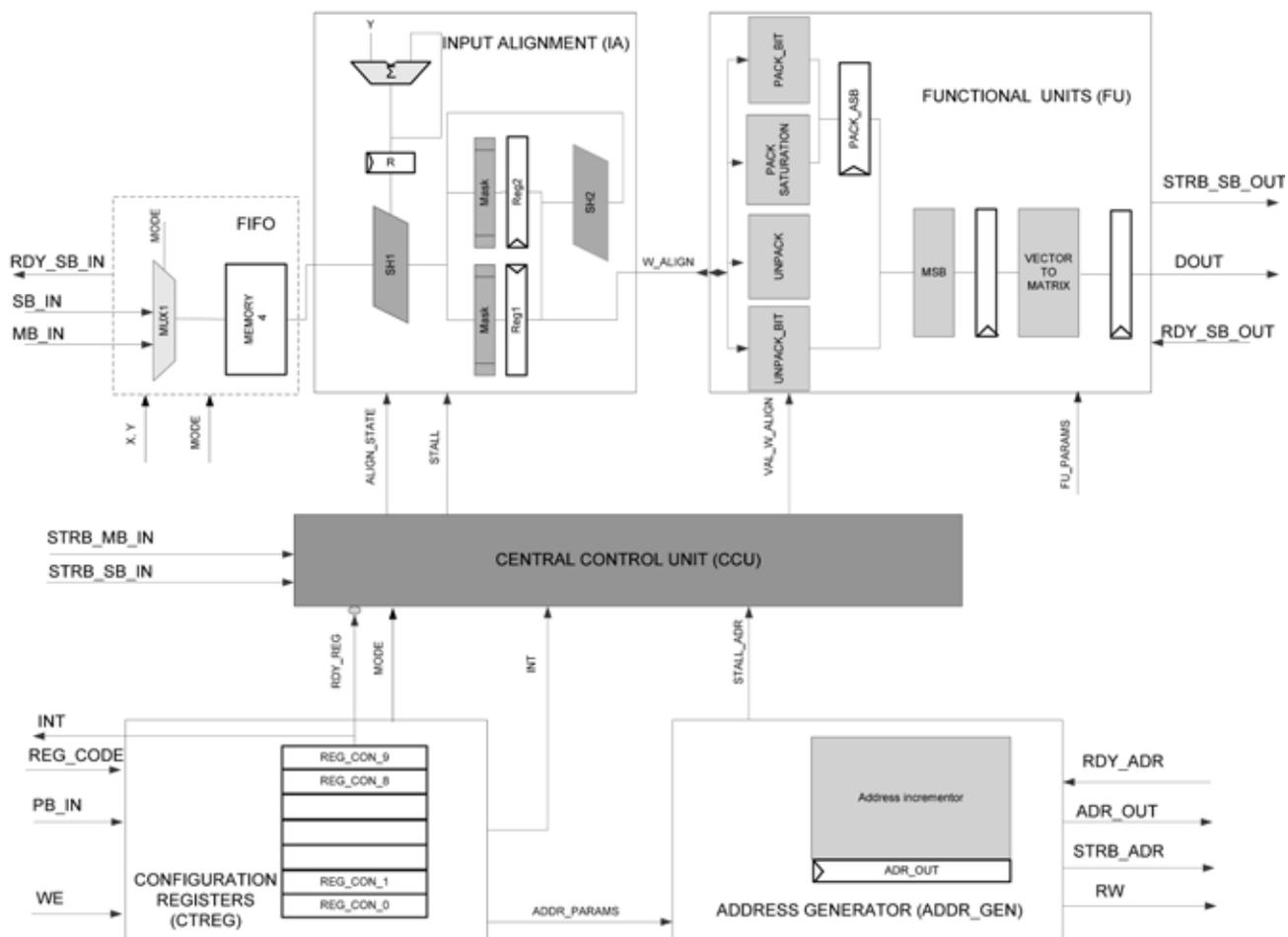


Рис. 5. Структурная схема PU

*Входное выравнивание IA* проводит предварительную обработку входного потока данных для дальнейших преобразований в функциональных узлах FU. Входной поток имеет следующие параметры:

- X — величина, на которую надо сдвинуть весь поток данных;
- Y — шаг, на который надо сдвинуть входной поток для получения очередного слова для дальнейшей обработки.

В узел входного выравнивания входят два сдвигателя: SH1 выполняет циклический сдвиг вправо 64-разрядного слова; SH2 выполняет сдвиг вправо двух 64-разрядных слов из Reg1 и Reg2. Выходы из SH1 и SH2 с помощью маски записываются в Reg1 и Reg2.

Функциональные узлы FU включают в себя следующие узлы: UNPACK (распаковка), UNPACK\_BIT (распаковка одноразрядная), PACK & SATURATION (упаковка и насыщение), PACK\_BIT (упаковка одноразрядная), PACK\_ASB (сборка упаковки), MSB (выдача, начиная со старших элементов), VECTOR\_TO\_MATRIX (преобразование слова в матрицу).

В функциональные узлы из входного выравнивания приходит одно 64-разрядное слово W\_ALIGN, сопровождаемое признаком значимости VAL\_W\_ALIGN.

При распаковке с помощью комбинационной логики из W\_ALIGN формируется одно выходное слово. В общем случае используются не все разряды входного слова. Результатом узла распаковки является одно 64-разрядное слово, которое поступает в узел MSB, где в случае необходимости меняется порядок элементов. Далее, если MATOUT = 1, этот результат выдается в виде матрицы, которая состоит из 64/M слов.

При упаковке возможен выбор любых необходимых разрядов внутри элементов с отбрасыванием остальных, параметр XS равен числу разрядов от начала элемента до первого упаковываемого разряда.

В режиме без насыщения разряды, не попадающие в элемент выходного слова, просто теряются. В режиме с насыщением, если теряются старшие значащие разряды, то в качестве результата в зависимости от знака входного элемента выдается максимальное по абсолютной величине положительное число 011...1 или отрицательное

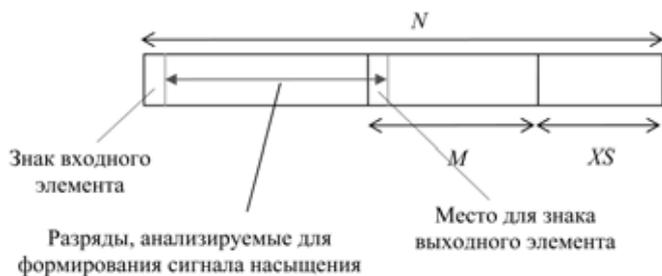


Рис. 6. Упаковка с насыщением

Результаты синтеза PU

Параметр	ИТМиВТ	Заказчик	Требуемое значение
Комбинационная логика, вентиля	18 766	10 000	—
Триггера, шт.	960	5 500	—
Общая площадь, вентиля	29 870	65 000	50 000
Глубина конвейера	5	68	—
Частота, МГц	333	—	327,68

число 10...0. Значащими разрядами положительного числа являются разряды, равные 1; значащими разрядами отрицательного числа являются разряды, равные 0. На рис. 6 показана упаковка с насыщением одного элемента.

Требуемые для анализа насыщения при упаковке разряды выделяются маской, которая хранится в конфигурационных регистрах. На их основании для каждого разряда формируются сигналы `saturation_to_0` и `saturation_to_1`.

Конечный результат упаковки  $64/N$  элементов (число элементов в одном 64-разрядном входном слове) с насыщением определяется по формуле

$$RES\_PACK =$$

$$= (((\overline{\text{mask\_sign}}\{1'b0, \text{saturation\_to\_0}\}) \& \text{pack\_res}\{\text{mask\_sign} \& \text{sign}\{1'b0, \text{saturation\_to\_1}\}),$$

где `mask_sign` — маска, определяющая место знака в выходных элементах; `sign` — знаки выходных элементов; `pack_res` — результат упаковки без насыщения.

Центральное управление устройством ССУ описано с помощью конечного автомата.

После системного сброса устройство находится в нулевом состоянии, в этом состоянии открыт прием на конфигурационные регистры, остальные узлы не работают. Когда в последний регистр прописывается режим работы, устройство переходит в первое состояние. В этом состоянии входной буфер начинает принимать данные по шине `MB_IN` или `SB_IN`. После того как в FIFO записано первое слово, устройство может перейти:

- в состояние 2, если `IA` не содержит достаточное число разрядов для дальнейшей обработки в `FU`. После появления второго слова в FIFO устройство переходит в состояние 3;

- в состояние 3, если FIFO не требует еще данных.

Из состояния 3, если вырабатывается сигнал окончания операции `INT`, устройство переходит в начальное состояние 0.

Из состояния 3 устройство также может перейти в состояние 4, если узел `FU` все еще готов к работе, но `IA` не удалось получить следующие данные из буфера. При этом ССУ останавливает конвейер в узле `IA`. Если данные отсутствуют из-за внешних блокировок на входе `PU`, то устройство в этом состоянии ждет появления нужных данных, затем переходит обратно в состояние 3. Если на входе данных больше не должно быть, так как все входные слова получены, все узлы `PU` останавливаются, кроме `FU`. Этот узел продолжает обрабатывать и выдавать результаты до тех пор, пока все результаты будут отправлены, установится сигнал `INT = 1` и устройство перейдет в начальное состояние 0, операция окончена.

### 3. Верификация и синтез устройства

Сначала функциональные узлы верифицировали автономно путем сравнения результатов проверяемого модуля и его функциональной модели. Входные данные генерировались случайным образом, кроме случая упаковки с насыщением, когда использовались случайные направленные тесты. При комплексной отладке проводился полный перебор значений конфигурационных регистров.

Синтез устройства выполнен с помощью пакета `Design Compiler` на библиотеке 90 нм.

Заказчик первоначально предлагал использовать коммутационную матрицу  $64 \times 64$ , обеспечивающую произвольную коммутацию любого разряда в любой и позволяющую проводить такие операции над входными данными, как распаковка, перестановка разрядов, упаковка и т. д.

Недостатки этой схемы заключаются в следующем:

- требуется много оборудования;
- глубина конвейера составляет 64 уровня, при небольших потоках данных это снижает производительность устройства;
- очень сложный алгоритм управления матрицей.

В таблице приведен результат синтеза устройства `PU`, для сравнения также приведена оценка для структуры, предложенной заказчиком.

Анализ полученных результатов показывает, что требования технического задания по рабочей частоте, производительности и объему оборудования полностью выполнены.

#### Список литературы

1. Черников В. М., Вискне П. Е., Шелухин А. М., Шевченко П. А., Панфилов А. П., Косоруков Д. Е., Черников А. В. Семейство процессоров обработки сигналов с векторно-матричной архитектурой `NeuroMatrix®` // Компоненты и технологии. 2006. № 8. С. 78—88.

**И. М. Алиев**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.,  
Институт кибернетики НАН Азербайджана,  
e-mail: sesh@mincom.gov.az

## Управление трафиком в транзитных BGP/MPLS-сетях

*Приводится модель управления трафиком в транзитных BGP/MPLS-сетях. В качестве критерия оптимизации используется стоимость доставки трафика с учетом требований SLA-соглашений, а также характеристики сети.*

**Ключевые слова:** BGP/MPLS-сети, префикс, автономные системы, штрафные функции, трафик, SLA-соглашения, задержка, полоса пропускания

### Введение

В последние годы в связи с резким увеличением объемов передаваемой информации в сети Интернет, необходимостью передачи аудио- и видеоинформации возникла потребность в разработке новой коммуникационной технологии, способной обеспечить передачу разных видов информации с заданным качеством обслуживания. Одной из таких технологий является многопротокольная коммутация меток MPLS (*multiprotocol label switching*), разработанная рабочей группой по созданию интегрированных услуг IETF [1]. Это новая архитектура построения магистральных сетей, сочетающих в себе возможности управления трафиком, присущие технологиям канального уровня, и масштабируемость и гибкость протоколов, характерных для сетевого уровня. Она значительно расширяет имеющиеся перспективы масштабирования, повышает скорость обработки трафика и предоставляет огромные возможности для организации дополнительных услуг.

В отечественной и зарубежной литературе имеется ряд публикаций, посвященных различным аспектам проектирования и работы MPLS-сетей [2–7]. В данной работе приводится модель управления трафиком в транзитной BGP/MPLS-сети на основе SLA-соглашений и с учетом характеристики сети.

### 1. BGP/MPLS-сети

Сеть Интернет представляет собой множество доменов маршрутизации, разделенных на различные административные единицы, которые называются автономными системами (*autonomous systems, AS*) [8]. Существуют три класса автономных систем, одним из которых являются многоканаль-

ные транзитные AS. Транзитные AS — это системы с множественной адресацией, которые принимают информацию от внешних автономных систем и выполняют маршрутизацию этой информации к другим внешним AS. Транзитным (по отношению к многоканальной AS) является любой трафик, отправитель и получатель которого не принадлежат к локальной AS. Маршрутизация между различными AS осуществляется с помощью протоколов внешнего шлюза BGP-4 [8].

Процесс обмена маршрутами между автономными системами состоит в обмене специальным набором данных, которые содержат префиксы сетей и их атрибутов. Атрибуты — это специальные данные, соответствующие префиксу и несущие ряд служебной информации о данном префиксе. IP-префикс представляет собой IP-адрес сети с отображением числа битов (префикс/длина), которые составляют сетевой адрес (например, 192.56.0.0/16) [8, 9]. Такая система помогает объединять сети (с точки зрения маршрутизации), что позволяет провайдерам объявлять одну IP-сеть вместо объявления каждой в отдельности. Например, сеть с IP-адресами 192.56.0.0, 192.56.1.0, 192.56.2.0, ..., 192.56.255.0 может быть объявлена одним IP-префиксом 192.56.0.0/16. Это позволяет существенно уменьшить объемы служебной информации. Каждая автономная система имеет группу из одного или нескольких IP-префиксов.

В последние годы в связи с применением MPLS-технологий операторы начали предоставлять MPLS-услуги. В основе MPLS лежит принцип обмена метками [8, 9]. Группа маршрутизаторов, осуществляющих коммутацию по меткам, находящимся под единым административным подчинением, и функционирующих в соответствии с единой политикой маршрутизации, образует BGP/MPLS-домен (рис. 1).

BGP/MPLS-домен образуется двумя типами маршрутизаторов: маршрутизаторы, поддерживающие коммутацию по меткам, и традиционную IP-маршрутизацию (LSR), и граничные маршрутизаторы (LER), расположенные на границе MPLS-домена. Граничные маршрутизаторы LER присваивают пакету начальную метку при его поступлении в опорную сеть MPLS и удаляют эту метку в момент, когда пакет покидает сеть. В MPLS прохождение данных осуществляется по путям с коммутацией по меткам (*label switching path, LSP*), образованным узлами от места вхождения пакета в сеть до его выхода по направлению к получателю.

Внутри BGP/MPLS-домена используются протоколы внутренней маршрутизации (например, протоколы EIRGP, OSRF и др.). Граничные мар-

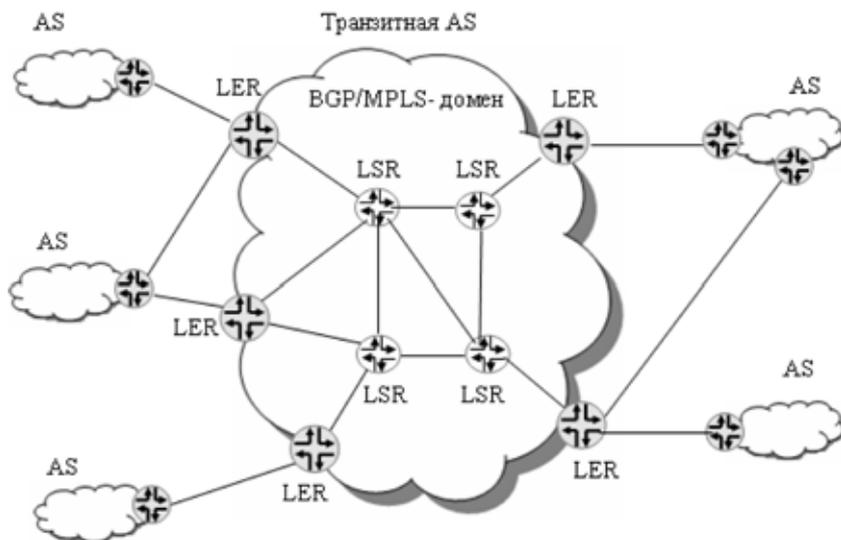


Рис. 1. Структура BGP/MPLS-сети

шрутизаторы LER образуют единую автономную систему BGP. Такие сети называют BGP/MPLS-сетями.

## 2. Общая постановка задачи

Цель каждого провайдера, в том числе и провайдера BGP/MPLS-сети, — получение максимальной прибыли. Поэтому провайдер BGP/MPLS-сети при передаче транзитного трафика должен выбрать путь с минимальной стоимостью. При этом, естественно, необходимо учитывать и характеристики сети, в частности пропускную способность каналов связи, через которые BGP/MPLS-сеть подключена к автономным системам.

На практике один и тот же префикс может достичь LER через разные граничные маршрутизаторы (рис. 2). Поэтому в управлении трафиком в BGP/MPLS-сети немаловажное значение имеет правильный выбор граничного маршрутизатора LER, через который передается трафик до нужного префикса, так как неправильный выбор граничного маршрутизатора (исходящего канала связи) в BGP/MPLS-сети может привести к нагрузке на отдельные исходящие каналы связи.

Кроме того, взаимоотношения между автономными системами и транзитной BGP/MPLS-сетью определяются, как правило, на основе соглашения об уровне сервиса — SLA-соглашения (*service level agreement, SLA*) [11]. SLA-соглашение определяет взаимную ответственность провайдера BGP/MPLS-сети и

пользователей этого сервиса автономных систем. SLA-соглашение включает как общие положения (права и обязанности участников соглашения и т. п.), так и различные регламентирующие данные (требования), определяющие уровень качества сервиса (QoS — *quality of service*).

Как правило, клиенты в SLA-соглашениях договариваются о предельных значениях показателей (например, задержки, полосы пропускания и др.) При нарушении условий SLA-соглашений по предельным значениям этих показателей выплачивается штраф, размеры которого возрастают с увеличением отклонения от порогового значения. Поэтому при выборе маршрута для передачи трафика необходимо учитывать и требования SLA-соглашений, и минимизировать размеры штрафов. Это особенно важно при работе BGP/MPLS-сети на предельных нагрузках. Провайдер BGP/MPLS-сети заключает индивидуальные SLA-соглашения с клиентами с различными требованиями к уровню качества обслуживания. Поэтому при ограниченных ресурсах минимизация стоимости доставки трафика не обеспечивает минимальных размеров возможных штрафов. В данной работе вопросы организации LSP-путей внутри BGP/MPLS-сетей не рассматриваются.

## 3. Математическая постановка задачи

Пусть  $i$  — индекс множества автономных систем, которые передают свои трафики через транзитные BGP/MPLS-сети, и  $j$  — индекс множества префиксов.

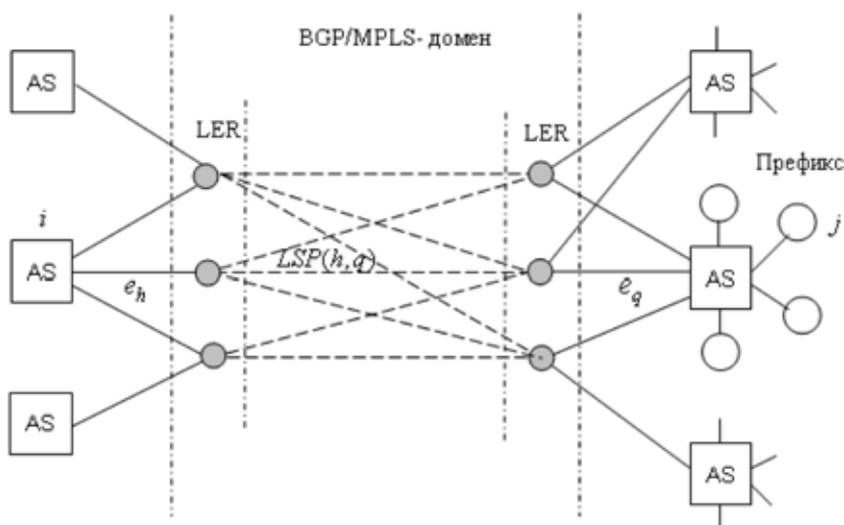


Рис. 2. Схема передачи транзитного трафика

Обозначим через  $E = \{e_h | h = \overline{1, N}\}$  множество физических каналов связи, соединяющих транзитные BGP/MPLS-сети с соседними автономными системами. Каждая автономная система может иметь несколько каналов связи для ввода трафика в BGP/MPLS-сети через разные граничные маршрутизаторы (рис. 2). При этом выбор того или иного канала связи для ввода трафика в BGP/MPLS-сети осуществляется автономными системами самостоятельно. Кроме того, доставка трафика автономных систем до заданного префикса может осуществляться через разные каналы связи.

Пусть  $e_h$  и  $e_q$  — входящие и исходящие каналы связи BGP/MPLS-сетей. Введем следующие обозначения:

$B^\uparrow(e_q)$  — часть пропускной способности канала  $e_h$ , выделенная для исходящего трафика;

$LSP(h, q)$  — путь, организованный между  $e_h$  и  $e_q$  и проходящий через BGP/MPLS-сети;

$C(h, q)$  — стоимость доставки единицы трафика по пути  $LSP(h, q)$ ;

$S_i(LSP(h, q))$  — размер штрафа при передаче трафика  $i$ -й автономной системе по пути  $LSP(h, q)$ ,  $\forall i S_i(LSP(h, q)) \geq 0$ . При этом  $S_i(LSP(h, q)) = 0$ , если условия SLA-соглашений не нарушены.

Введем булеву переменную  $x_{ihj}^q$ , при этом  $x_{ihj}^q = 1$ , если трафик, входящий через канал связи  $e_h$ , передается в  $j$ -й префикс, через исходящий канал связи  $e_q$ ,  $x_{ihj}^q = 0$  в противном случае.

Обозначим через  $E_i^\downarrow$  ( $E_i^\downarrow \in E$ ) множество входящих каналов связи, через которые вводится транзитный трафик  $i$ -й автономной системы, а через  $E_j^\downarrow$  ( $E_j^\downarrow \in E$ ) — множество исходящих каналов связи, через которые транзитный трафик может быть доставлен в  $j$ -й префикс.

Тогда математическая модель оптимального управления транзитным трафиком в BGP/MPLS-сети будет иметь следующий вид:

$$\sum_j \sum_i \sum_h \sum_{E_i^\downarrow} \sum_{E_j^\downarrow} x_{ihj}^q [C(h, q)B_i(h, j) + S_i(LSP(h, q))] \rightarrow \min \quad (1)$$

при условии

$$\forall q \sum_{j: q \in E_j^\downarrow} \sum_i \sum_{h \in E_i^\downarrow} x_{ihj}^q B_i(h, j) \leq B^\uparrow(e_q); \quad (2)$$

$$\forall i, h, j \sum_{q \in E_j^\downarrow} x_{ihj}^q = 1, \quad (3)$$

где  $B_i(h, j)$  — объем трафика  $i$ -й автономной системы, входящего по каналу связи  $e_h$  и передаваемого в  $j$ -й префикс через BGP/MPLS-сети.

В модели (1) условие (2) означает, что объем транзитного трафика, передаваемого через канал связи  $e_q$ , не должен превышать его исходящей про-

пускной способности. А условие (3) означает, что для любой автономной системы весь трафик, предназначенный для выбранного префикса, проходит только через один исходящий канал связи.

#### 4. Реализация модели

Пусть SLA-соглашение включает  $k$  — показатель качества  $Q_m$ ,  $m = \overline{1, k}$ . Требование по качеству услуг, как правило, состоит из набора ограничений  $\bigcup_m \{Q_m \circ Q_m^{SLA}\}$ , где  $Q_m$  — показатели;  $Q_m^{SLA}$  — предельные значения показателя  $Q_m$ ,  $m = \overline{1, k}$ , которые фиксированы в SLA-соглашении;  $\circ$  — оператор взаимосвязи ограничений.

В этом случае общая задача управления трафиком заключается в нахождении пути  $LSP(h, q)$ , при котором для  $\forall m$  выполняются  $Q_m \mathfrak{R} Q_m^{SLA}$  и ряд других ограничений, связанных с возможностями сети BGP/MPLS. Здесь  $\mathfrak{R}$  представляет собой один из символов неравенства  $<$ ,  $>$ ,  $\leq$  или  $\geq$ .

Множество показателей  $Q = \{Q_m\}$ ,  $m = \overline{1, k}$ , характеризующих качество предоставляемых услуг, разделим на два подмножества —  $A^{(1)}$  и  $A^{(2)}$ . В подмножество  $A^{(1)}$  входят те показатели, высокие значения которых свидетельствуют о высоком качестве предоставляемых услуг (например, ширины полосы пропускания). А в подмножество  $A^{(2)}$  входят показатели, низкие значения которых свидетельствуют о высоком качестве предоставляемых услуг (например, задержки пакетов).

Провайдер должен обеспечить качество услуг согласно SLA-соглашению, т. е. должны выполняться условия  $\forall m Q_m \geq Q_m^{SLA}$ , если  $Q_m \in A^{(1)}$  и  $\forall m Q_m \leq Q_m^{SLA}$ , если  $Q_m \in A^{(2)}$ ,  $m = \overline{1, k}$ . При нарушении договора согласно условиям SLA-соглашений провайдер выплачивает штрафы.

На практике выбор маршрута (пути) для передачи трафика осуществляется на основе метрики. Выбор той или иной метрики зависит от конкретного протокола маршрутизации, применяемого в BGP/MPLS-сетях. Например, наиболее широко применяемые в Интернете Cisco-маршрутизаторы с протоколом маршрутизации EIGRP при выборе пути используют следующие параметры: задержка, пропускная способность (ширина полосы пропускания), нагрузка, надежность [9]. В общем случае метрика пути между источником  $s$  и конечным пунктом назначения  $t$  определяется как:

$$M(s, t) = [B(s, t)K_B + (B(s, t)K_L / (256 - L(s, t)) + D_\Sigma(s, t)K_D] [K_{MTU} / (R(s, t) + K_R)], \quad (4)$$

где  $B(s, t)$  — наименьшая ширина полосы пропускания канала между источником  $s$  и конечным

пунктом назначения  $t$ ;  $L(s, t)$  — наихудший относительный показатель нагрузки канала между источником  $s$  и конечным пунктом назначения  $t$ ;  $D_{\Sigma}(s, t)$  — суммарная задержка всего пути между источником  $s$  и конечным пунктом назначения  $t$ ;  $R(s, t)$  — наихудший относительный показатель надежности канала между источником  $s$  и конечным пунктом назначения  $t$ .

Коэффициенты  $K_B$ ,  $K_L$ ,  $K_D$ ,  $K_R$  соответствуют показателям полосы пропускания, нагрузки, задержки и надежности соответственно. Коэффициент  $K_{MTU}$  характеризует наименьшее значение MTU-канала между источником и пунктом назначения. Если MTU не учитывается, метрика вычисляется как:

$$M(s, t) = [B(s, t)K_B + (B(s, t)K_L / (256 - L(s, t)) + D_{\Sigma}(s, t)K_D]. \quad (5)$$

По умолчанию используются только два параметра: ширина полосы пропускания и задержка, и метрика вычисляется как

$$M(s, t) = B(s, t)K_B + D_{\Sigma}(s, t)K_D. \quad (6)$$

Коэффициенты  $K_B$  и  $K_D$  фактически являются весовыми коэффициентами, определяющими важность значений ширины полосы пропускания и задержки. Значения этих коэффициентов зависят от типа обслуживания, запрашиваемого для трафика. По умолчанию  $K_B = 1$  и  $K_D = 1$ . Значения параметров отображаются в команде **show interface** протокола EIGRP.

Пусть сеть Fast Ethernet ( $IP$ -адрес 192.168.72.1/24) через маршрутизатор s/0 ( $IP$ -адрес 192.168.72.0/24) в городе Site\_1 соединена с маршрутизатором t/0 ( $IP$ -адрес 192.168.64.5/30) в городе Site\_2 с линией T1. Текущие параметры соединений, отраженных в команде **show interface**, приведены на рис. 3. На рис. 3  $BW$  — полоса пропускания,  $DLY$ -задержка,  $Rely$  — надежность и  $load$  — загрузка канала. Вычисленные значения отдельных показателей приведены в таблице.

При вычислении метрики на основе этих параметров берутся  $B(s, t) = \max(256(10000000/BW))$ ,  $L(s, t) = \max(load)$  и  $D_{\Sigma}(s, t) = \sum 256DLY/10$ ,  $R = \min(rely)$ . Тогда согласно (5) имеем  $M(s, t) = 2338202$ .

Таким образом, метрика пути до 192.168.72.0/24 равна 2338202. А без учета загрузки каналов вычисленная метрика по формуле (6) до префикса 192.168.72.0/24 составляет  $M(s, t) = 2172416$ .

Обозначим через  $M(h, q)$  метрику для пути  $LSP(h, q)$ , а через  $M_i^{SLA}$  — метрику для  $i$ -й автономной системы, удовлетворяющей условиям SLA-соглашений. Тогда разницу между  $M(h, q)$  и  $M_i^{SLA}$  в общем виде определим как

$$\Delta M_i(h, q) = M(h, q) - M_i^{SLA}. \quad (7)$$

```
Site_1 show interface s/0
Ethernet0 is up, line protocol is up
MTU 1500 byte, BW 100000 Kbit, DLY 100 usec
Rely 255/255, load 10/256
<output omitted>
Site_2 show interface t/0
Description: Out to Site_1
Internet address is 192.168.64.5/30
MTU 1500 byte, BW 1544 Kbit, DLY 20000 usec
Rely 234/255, load 246/256
<output omitted>
```

Рис. 3. Примерный вид команды show interface

Данные для вычисления метрики

Типы соединений	Показатели			
	256 (10 000 000/BW)	load	256DLY/10	rely
Fast Ethernet	25 600	10/255	2 560	255/255
T1	1 657 856	246/255	512 000	234/255

При этом, если  $\Delta M_i(h, q) \leq 0$ , то передача трафика  $i$ -й автономной системе через BGP/MPLS-сети по пути  $LSP(h, q)$  приемлема, а если  $\Delta M_i(h, q) > 0$ , то это означает, что при выборе пути  $LSP(h, q)$  для передачи трафика  $i$ -й автономной системе через BGP/MPLS-сети нарушаются условия SLA-соглашений. Таким образом, минимизация штрафа  $S_i(LSP(h, q))$  сводится к  $\Delta M_i(h, q) \rightarrow \min$ .

Рассмотрим вычисления  $\Delta M_i(h, q)$ . Пусть  $B_i^{SLA}$  — требуемая полоса пропускания  $i$ -й автономной системы, фиксированной в SLA-соглашении, и  $D_i^{SLA}$  — средняя допустимая задержка трафика  $i$ -й автономной системы, фиксированной в SLA-соглашении. Тогда с учетом того, что  $B(h, q) \in A^{(1)}$  и  $D_{\Sigma}(h, q) \in A^{(2)}$ , по формулам (6) и (7) для пути  $LSP(h, q)$  имеем

$$\Delta M_i(h, q) = ( \hat{B}_i^{SLA} - B(h, q) ) K_B + ( D_{\Sigma}(h, q) - \hat{D}_i^{SLA} ) K_D, \quad (8)$$

где  $D_{\Sigma}(h, q)$  — суммарная задержка между входящим каналом связи  $e_h$  и исходящим каналом связи  $e_q$ ;  $B(h, q)$  — полоса пропускания канала связи между входящим каналом связи  $e_h$  и исходящим каналом связи  $e_q$ . В формуле (8)  $\hat{B}_i^{SLA} = 256(10000000/B_i^{SLA})$ ,  $\hat{D}_i^{SLA} = 256 D_i^{SLA}/10$ .

Размер штрафа определяется по функции штрафа  $S_i(LSP(h, q)) = \varphi(\Delta M(h, q))$ , конкретный вид которого заранее известен. В качестве функции штрафа

фа, как правило, используется ступенчатая и непрерывная дифференцируемая функция [12].

### Заключение

В данной статье описана модель управления трафиком в транзитных BGP/MPLS-сетях с учетом ограничения на характеристики сетей и условия SLA-соглашений. В качестве критериев минимизации используются стоимость доставки трафика через BGP/MPLS-сети и размеры штрафа, выплачиваемого провайдером BGP/MPLS-сети при нарушении условий SLA-соглашений. Применение такой модели позволит повысить эффективность BGP/MPLS-сетей при их предельных нагрузках.

### Список литературы

1. **MPLS Architectural Considerations for a Transport Profile / ITU-T — IETF Joint Working Team** URL: [http://www.ietf.org/MPLS-TP\\_overview-22.pdf](http://www.ietf.org/MPLS-TP_overview-22.pdf).
2. **Bosco A., Botta A., Conte G.** and etc. Internet like control for MPLS based traffic engineering: performance evaluation // Performance Evaluation. 2005. Vol. 59. Is. 2—3. P. 121—136.

3. **Lin N., Qi H. A.** QoS Model of Next Generation Network based on MPLS // Network and Parallel Computing Workshops, 2007. NPC Workshops. IFIP International Conference, 18—21 Sept. 2007. P. 915—919.
4. **Зайченко Ю. П., Аникиев А. С., Моссавари М.** и др. Синтез структуры глобальных компьютерных сетей с технологией MPLS при ограничениях на показатели качества и живучести // Электроника и связь. 2006. № 31 (2). С. 68—71.
5. **Chou C.** Traffic engineering for MPLS-based virtual private networks // Computer Networks. 2004. Vol. 44, Is. 3. P. 319—333.
6. **Awduche P., Jabbari B.** Internet traffic engineering using multi-protocol label switching (MPLS) // Computer Networks. 2002. Vol. 40. Is. 1. P. 111—129.
7. **Олвейн В.** Структура и реализация современной технологии MPLS. Руководство Cisco: Пер. с англ. М.: Вильямс, 2004. 480 с.
8. **Хелеби С., Ферсон М.** Принципы маршрутизации в Интернет: Пер. с англ. М.: Вильямс, 2001. 448 с.
9. **Пакег К., Тип Д.** Создание масштабируемых сетей Cisco: Пер. с англ. М.: Вильямс, 2004. 792 с.
10. **Верешна Ш.** Качество обслуживания в сетях IP: Пер. с англ. М.: Вильямс, 2003. 368 с.
11. **Хелд Г.** Соглашения об уровне сервиса // LAN. 1998. Июль-август. С. 136—140.
12. **Ardagna D., Trabian M., Zhang L.** SLA Based Profit Optimization in Multi-tier Systems // IEEE NCA 2005 Proc. 4th International Symposium on Network Computing and Applications. Boston. 2005. P. 263—266.

УДК 004.7(075.8)

**В. Г. Шахов**, канд. техн. наук, проф.,  
**О. Н. Коваленко**, ст. преподаватель, e-mail: [onkovalenko@mail.ru](mailto:onkovalenko@mail.ru),  
Омский государственный университет путей сообщения

## Модель распределения пропускной способности каналов мультисервисной сети между потоками с различными параметрами качества обслуживания

*Предлагается методика оценки состояния пучка каналов мультисервисной сети при интеграции трех видов нагрузки: речевой, видеонагрузки и нагрузки пакетов данных на основе стратегии с адаптивным разделением канала. Приводятся числовые характеристики показателей качества обслуживания, полученные на основе разработанных алгоритмов.*

**Ключевые слова:** сеть, обслуживание, интеграция, разделение, качество, потери, задержка

### Введение

Анализ развития современных телекоммуникационных сетей показывает, что в настоящее время происходит постепенное преобразование телефонных сетей в мультисервисные сети (МС), которые строят на базе сетей с коммутацией пакетов. Одной из самых больших технических проблем при передаче мультимедийных приложений по пакетным сетям является обеспечение качества обслуживания при обработке данных. Именно плохая приспособленность сетей с коммутацией пакетов к передаче трафика реального времени,

как отмечается во многих источниках, сдерживает повсеместное развитие мультисервисных сетей.

Для улучшения параметров качества обработки пакетов, таких как время ожидания и потери пакетов, требуются специальные алгоритмы управления трафиком. Как правило, в основе таких алгоритмов лежит обслуживание на основе приоритетов [1]. При этом потоку каждого приоритета выделяется определенное число единиц канального ресурса. Различают фиксированное и адаптивное распределение ресурса [2]. В случае использования фиксированного распределения ка-

нального ресурса пакеты других приоритетов не могут использовать свободные ресурсы рассматриваемого приоритета.

В работах [3, 4] рассматривается адаптивное распределение канального ресурса на основе подвижной границы, особенность которой в том, что пакеты низкоприоритетных потоков могут занимать канальный ресурс более высокоприоритетных потоков. Это приводит к улучшению показателей качества обслуживания для низкоприоритетных потоков и увеличивает коэффициент использования канала. Однако в работах [3, 4] приводится модель интеграции речевой нагрузки и нагрузки данных только для узкополосных сетей ISDN, в которых речевая нагрузка обслуживается по системе с потерями, а нагрузка данных — с ожиданием.

В современных мультисервисных сетях пакеты любого приложения обслуживаются по системе с ожиданием. Следовательно, аналитические выражения, полученные в работе [3], нельзя использовать для анализа функционирования мультисервисной сети.

Расширим модель, рассмотренную в работе [3], на мультисервисную сеть, обрабатывающую потоки трех видов: речь, видео и данные.

### Описание математической модели

Рассмотрим многоканальную модель, системы массового обслуживания (СМО) с интеграцией данных типа  $3M/M/N/m$ , где  $3M$  — три класса нагрузки с пуассоновским распределением входного потока;  $M$  — экспоненциальное распределение времени обслуживания;  $N$  — число единиц канального ресурса;  $m$  — емкость буфера. В данной модели предлагается объединение трех классов нагрузок: 1-й класс нагрузки по отношению ко 2-му и 3-му имеет высший приоритет; 2-й класс нагрузки имеет более высокий приоритет по отношению к 3-му. Также предполагается, что нагрузка каждого класса обслуживается по принципу СМО с ожиданием при условии ограничения по длине очереди, т. е. учитывается, что буфер системы имеет конечную длину  $m$ , при этом для  $i$ -го класса нагрузки максимальная емкость буфера составляет  $m_i$ ,  $m = \sum_{i=1}^3 m_i$ .

Пусть имеется канал с пропускной способностью  $N$  единиц канального ресурса, который делится на три части:  $N_1$  — число единиц канально-

го ресурса 1-го класса нагрузки,  $N_2$  — 2-го класса нагрузки, а число единиц канального ресурса 3-го класса нагрузки

$$N_3 = N - N_1 - N_2. \quad (1)$$

Признаки подвижной границы заключаются в том, что пакеты нагрузки 2-го класса могут занимать свободный канальный ресурс  $N_1$  (рис. 1), если он не используется в данный момент времени. При этом под обработку пакетов нагрузки 3-го класса отводится  $N_3$  единиц канального ресурса. В случае, если есть канальный ресурс, не занятый под обработку нагрузок более высоких классов, он может быть использован для передачи информации 3-го класса.

Получим вероятностно-временные характеристики метода обслуживания с адаптивным разделением ресурса. Для этого рассмотрим модель в области без перегрузок: для коэффициентов загрузки канала 2-го ( $\rho_2$ ) и 3-го типа ( $\rho_3$ ) соответственно выполняется условие —  $\rho_2 < 1, \rho_3 < 1$ . Предполагается, что очередь пакетов 2-го класса находится в установившемся режиме, т. е.  $\mu_2 > \mu_1$ . Пользуясь результатами, приведенными в работе [3], определим время ожидания пакетов второго класса.

Время ожидания или задержки пакетов 2-го класса оценим как значение, обратно пропорциональное величине

$$\alpha_2 = N_1 + N_2 - [N_2\rho_2 + N_1\rho_1(1 - P_1(N_1))], \quad (2)$$

где  $P_1(N_1)$  — вероятность занятия  $N_1$  единиц канального ресурса.

В этом случае, если система обслуживания нагрузки 1-го класса работала в состоянии  $i$ , то число каналов, доступных нагрузке 2-го класса, было бы равно  $(N_1 + N_2 - i)$ ,  $0 \leq i \leq N_1$ . Однако схема с подвижной границей работает не только в состоянии  $i$ . Она проходит случайным образом по всем возможным значениям  $0 \leq i \leq N_1$ . Тогда приближенное выражение среднего времени ожидания нагрузки 2-го класса в общей схеме с подвижной границей при числе единиц канального ресурса  $N_2$  имеет вид

$$T_{ож2} = \frac{1}{\alpha_2\mu_2} \sum_{i=0}^{N_1} P_1(i)P_{ож2}(k_2), \quad (3)$$

где  $P_{ож2}(k_2)$  — вероятность того, что пакеты нагрузки 2-го класса будут поставлены на ожидание (то есть, что число требований превысит свобод-

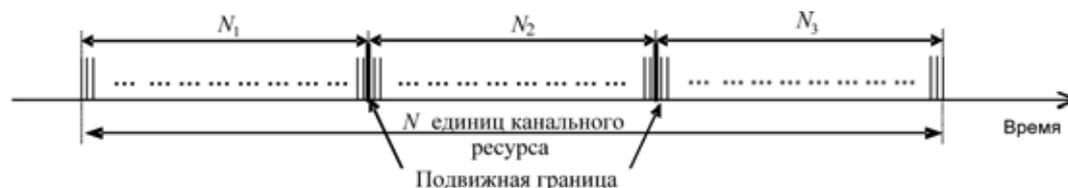


Рис. 1. Иллюстрация метода подвижной границы при обработке трех видов нагрузки

ный каналный ресурс  $k_2$ );  $P_1(i)$  — вероятность занятия  $i$ -го числа каналов.  $P_1(i)$  и  $P_{ож2}(k_2)$  определяем по известным формулам для многоканальной СМО с ограниченным буфером:

$$P_{ож2}(k_2) = \frac{(N_2\rho_2)^{k_2}}{k_2!} \sum_{S=1}^{m_2} (\rho_2)^S \left( \sum_{n=0}^{k_2} \frac{(N_2\rho_2)^n}{n!} + \frac{(N_2\rho_2)^{k_2}}{k_2!} \sum_{S=1}^{m_2} (\rho_2)^S \right)^{-1}; \quad (4)$$

$$P_i(i) =$$

$$= \frac{(i\rho_1)^i}{i!} \left( \sum_{k=0}^{N_1} \frac{(N_1\rho_1)^k}{k!} + \frac{(N_1\rho_1)^{N_1}}{N_1!} \sum_{S=1}^{m_1} (\rho_1)^S \right)^{-1}. \quad (5)$$

Вероятность потери пакета 2-го класса определяем по формуле

$$P_{пот2} = \sum_{i=0}^{N_1} P_1(i)P_2(M_2), \quad (6)$$

где

$$P_2(M_2) = \sum_{M_2=m_2}^{\infty} \frac{(N_2\rho_2)^{M_2}}{k_2! \left( \sum_{j=0}^{k_2} \frac{(N_2\rho_2)^j}{j!} + \frac{(N_2\rho_2)^{k_2}}{k_2!} \sum_{S=1}^{m_2} \rho_2^S \right)} \rho_2^{M_2}. \quad (7)$$

В выражениях (3)—(7)  $k_2 = N_1 + N_2 - i$ .

Для получения времени ожидания и потерь пакетов нагрузки 3-го класса воспользуемся теми же соображениями, что и для нагрузки 2-го класса, учитывая, что пакеты нагрузки 3-го класса могут занимать свободный каналный ресурс, отводимый как под нагрузку 1-го, так и под нагрузку 2-го класса. Тогда время ожидания пакетов 3-го класса обратно пропорционально величине  $\alpha_3 = N - [N_3\rho_3 + N_2\rho_2(1 - P_2(N_2)) + N_1\rho_1(1 - P_1(N_1))]$  и определяется по формуле

$$T_{ож3} = \frac{1}{\alpha_3 m_3} \sum_{i=0}^{N_1} P_1(i) \sum_{y=0}^{k_2} P_2(y) P_{ож3}(k_3), \quad (8)$$

где  $P_2(y)$  — вероятность наличия  $y$  требований 2-го класса на обслуживание и  $P_{ож3}(k_3)$  — вероятность ожидания пакетов 3-го класса, рассчитываются по известным формулам для СМО с ограниченным буфером:

$$P_2(y) = \frac{(N_2\rho_2)^y}{y!} \left( \sum_{n=0}^y \frac{(N_2\rho_2)^n}{n!} + \frac{(N_2\rho_2)^{k_2}}{k_2!} \sum_{S=1}^{m_2} \rho_2^S \right)^{-1}; \quad (9)$$

$$P_{ож3}(k_3) = \sum_{S=1}^{m_3} \frac{(N_3\rho_3)^{k_3}}{k_3!} \rho_3^S \times \left[ \sum_{j=0}^{k_3} \frac{(N_3\rho_3)^j}{j!} + \frac{(N_3\rho_3)^{k_3}}{k_3!} \sum_{S=1}^{m_3} \rho_3^S \right]^{-1}. \quad (10)$$

Вероятность потери пакета 3-го класса определяем по формуле

$$P_{пот3} = \sum_{i=0}^{N_1} P_1(i) \sum_{y=0}^{k_2} P_2(y) P_3(M_3), \quad (11)$$

где  $P_3(M_3) =$

$$= \sum_{M_3=m_3}^{\infty} \frac{[N_3\rho_3]^{k_3} \rho_3^{M_3}}{k_3! \left( \sum_{j=0}^{k_3} \frac{(N_3\rho_3)^j}{j!} + \frac{(N_3\rho_3)^{k_3}}{k_3!} \sum_{S=1}^{m_3} \rho_3^S \right)}. \quad (12)$$

В выражениях (8)—(12)  $k_3 = N - i - y$ . Длительность ожидания пакетов 1-го класса можно определить из условия [5]:

$$T_{ож1}(N_1) = \frac{(N_1\rho_1)^{N_1}}{\lambda_1 N_1!} \left( \sum_{k=0}^{N_1} \frac{(N_1\rho_1)^k}{k!} + \right.$$

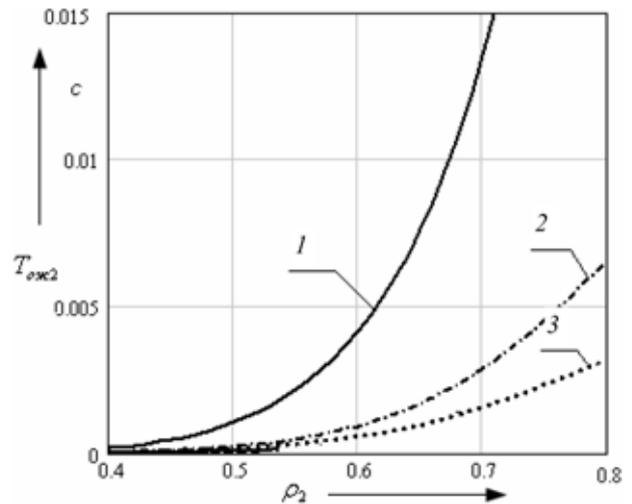


Рис. 2. Зависимость времени ожидания пакетов 2-го класса от загрузки канала

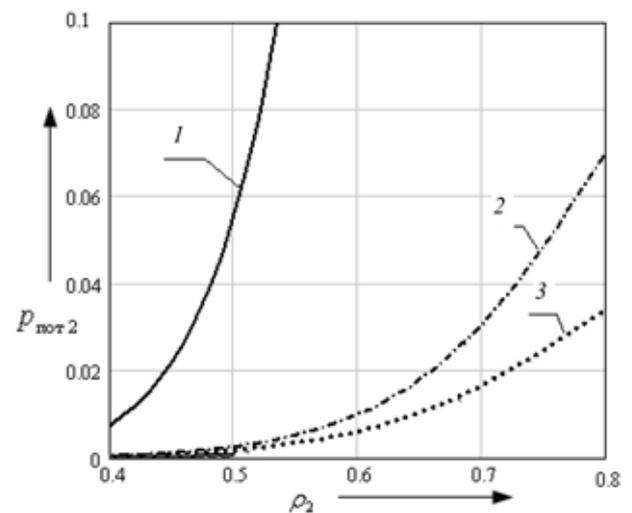


Рис. 3. Зависимость потери пакетов 2-го класса от загрузки канала

## Исследование математической модели

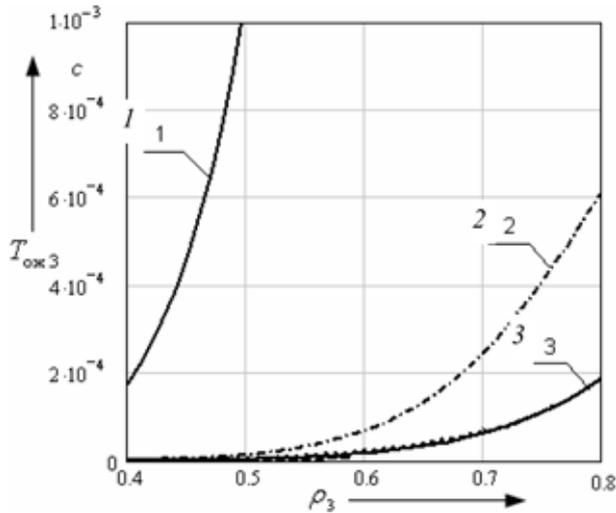


Рис. 4. Зависимость времени ожидания пакетов 3-го класса от загрузки канала

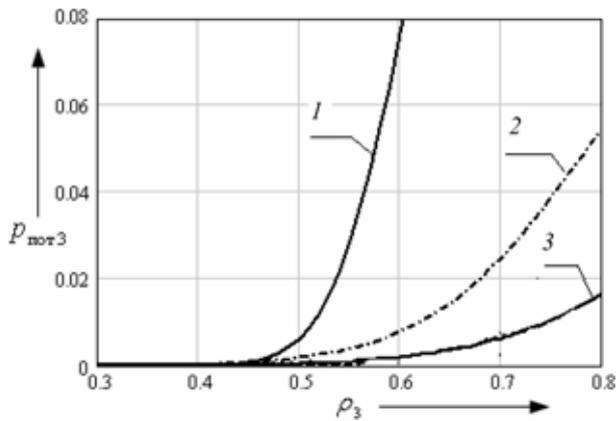


Рис. 5. Зависимость потери пакетов 3-го класса от загрузки канала

$$+ \frac{(N_1 \rho_1)^{N_1}}{N_1!} \sum_{s=1}^{m_1} \rho_1^s \Big)^{-1} \sum_{s=1}^{m_1} s \rho_1^s. \quad (13)$$

Вероятность потери пакета 1-го класса определяется по формуле [5]

$$P_{\text{пот}1} = \sum_{M_1=m_1}^{\infty} \frac{[N_1 \rho_1]^{N_1} \rho_1^{M_1}}{N_1! \left( \sum_{j=0}^{N_1} \frac{(N_1 \rho_1)^j}{j!} + \frac{(N_1 \rho_1)^{N_1}}{N_1!} \sum_{s=1}^{m_1} \rho_1^s \right)}. \quad (14)$$

На рис. 2 и 3 приведены зависимости времени ожидания и вероятности потерь пакетов 2-го класса от загрузки канала, на рис. 4 и 5 — соответствующие зависимости для пакетов 3-го класса. Для сравнения на этих же рисунках приводятся зависимости, полученные при фиксированном распределении канального ресурса между потоками.

Исходные данные: для рис. 2 и 3  $N = 30$ ;  $N_1 = 15$ ;  $N_2 = 10$ ; для рис. 4 и 5  $N = 30$ ;  $N_1 = 15$ ;  $N_2 = 10$ ;  $N_3 = 5$ . Обозначения, принятые на рис. 2, 3: 1 — фиксированное распределение канального ресурса; 2 — адаптивное разделение канального ресурса при  $\rho_1 = 0,8$ ; 3 — адаптивное разделение канального ресурса при  $\rho_1 = 0,6$ .

Обозначения, принятые на рис. 4, 5: 1 — фиксированное распределение канального ресурса; 2 — адаптивное разделение канального ресурса при  $\rho_1 = 0,8$ ;  $\rho_2 = 0,8$ ; 3 — адаптивное разделение канального ресурса при  $\rho_1 = 0,6$ ;  $\rho_2 = 0,8$ .

## Заключение

Таким образом, проведенные расчеты доказывают, что метод адаптивного распределения ресурсов, рассмотренный в данной работе, дает существенный выигрыш в характеристиках качества обслуживания по сравнению с фиксированным распределением канального ресурса.

Следует отметить, что время ожидания пакетов нагрузки 1-го класса является одинаковым как для фиксированного, так и для адаптивного распределения ресурсов. То есть при сохранении заданного качества обслуживания высокоприоритетной нагрузки использование разделения ресурсов на основе подвижной границы дает значительное уменьшение времени ожидания для пакетов низкоприоритетной нагрузки.

## Список литературы

1. Кучерявый Е. А. Управление трафиком и качество обслуживания в сети Интернет. СПб.: Наука и Техника, 2004. 336 с.
2. Крылов В. В., Самохвалова С. С. Теория телетрафика и ее приложения. СПб.: БВХ-Петербург, 2005. 288 с.
3. Шварц М. Сети связи: протоколы, моделирование и анализ: Ч. 2. М.: Наука, 1992. 326 с.
4. Бычков Е. Д., Коваленко О. Н. Оценка состояния каналов при интеграции данных на основе модели подвижной границы // Материалы VIII Международной конференции АПЭП-2006. Т. 4. Новосибирск: Изд. НГТУ, 2006. С. 225—227.
5. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. М.: Академия, 2005. 576 с.

УДК 004.932.4

**Е. В. Медведева**, канд. техн. наук, доц.,  
Вятский государственный университет,  
e-mail: emedv@mail.ru

## Нелинейная фильтрация статистически связанных видеопоследовательностей цифровых полутоновых изображений

*Рассмотрен метод синтеза алгоритмов фильтрации статистически связанных видеопоследовательностей (ВП) цифровых полутоновых изображений (ЦПИ), искаженных белым гауссовским шумом (БГШ). Метод основан на представлении ВП ЦПИ многомерными дискретно-значными марковскими процессами. Цифровое моделирование алгоритмов фильтрации ВП ЦПИ показало их высокую эффективность в условиях действия БГШ большой интенсивности. Синтезированные алгоритмы имеют ясный физический смысл и требуют для своей реализации небольшие вычислительные ресурсы.*

**Ключевые слова:** нелинейная фильтрация, марковский процесс, разрядное двоичное изображение, цифровое полутоновое изображение, видеопоследовательность, статистически связанные видеопоследовательности

### Введение

В настоящее время цифровые полутоновые изображения (ЦПИ) и их видеопоследовательности (ВП) нашли приложение во многих информационно-технических системах: радиолокационных, связи, телевизионных и т. д. На практике часто требуется передать последовательность изображений по сильно зашумленному каналу связи в реальном масштабе времени. Восстановление таких изображений известными методами в реальном масштабе времени сложно. Кроме того, известные линейные методы восстановления (фильтрации) изображений вследствие пространственной инерционности вызывают размытие границ деталей изображений. А известные нелинейные методы фильтрации (различного рода медианные фильтры и т. д.) неэффективны при наличии белого гауссовского шума (БГШ), особенно при малых отношениях сигнал—шум.

Особый интерес представляет фильтрация одной или нескольких статистически связанных ВП. На практике статистически связанными могут быть ВП, полученные при съемке одних и тех же сцен с разных позиций.

Такие ВП могут содержать в себе значительную статистическую избыточность, реализация которой может дать существенный выигрыш при восстановлении ЦПИ, искаженных БГШ. Небольшое число работ по фильтрации таких ВП вызвано сложностью создания математических моделей (ММ), адекватных реальным ВП ЦПИ, которые представляют собой многомерные многозначные процессы. Кроме того, ММ ВП ЦПИ должны однозначно определять структуру алгоритмов фильтрации, позволяющую максимально реализовать статистическую избыточность, содержащуюся в ВП для повышения качества восстановления ЦПИ, искаженных шумом. В качестве таких ММ ВП ЦПИ предлагается использовать многомерный многозначный марковский процесс (МП), для которого статистика значений элемента этого процесса, условная по значениям других элементов процесса, зависит только от значений тех из них, которые располагаются в непосредственной близости от рассматриваемого элемента [1, 2]. Теория условных МП позволяет синтезировать алгоритмы и устройства многомерной фильтрации, эффективно реализующие статистическую избыточность статистически связанных ВП ЦПИ. В работе [3] получен алгоритм фильтрации одной и двух статистически связанных ВП ЦПИ, однако в [3] отсутствуют качественные и количественные характеристики, подтверждающие эффективность работы алгоритма.

### Постановка задачи

Требуется синтезировать алгоритмы фильтрации двух статистически связанных ВП ЦПИ и исследовать эффективность реализации статистической избыточности между ВП ЦПИ для повышения качества восстановления ЦПИ, искаженных БГШ  $\eta(t)$  с нулевым средним и дисперсией  $\sigma_{\eta}^2$ .

Задачу фильтрации ВП ЦПИ можно свести к задаче фильтрации  $g$  последовательностей разрядных двоичных изображений (РДИ) с последующим их объединением на регистре  $g$ -разрядной выборки ЦПИ.

Для сравнения выигрыша в помехоустойчивости рассмотрим вначале фильтрацию одной и двух статистически связанных ВП ЦПИ. Для этого воспользуемся математическими моделями, разработанными в [1, 2].

### Алгоритм нелинейной фильтрации ВП ЦПИ

Будем считать, что элементы последовательности  $l$ -х РДИ  $\{\mu_{i,j,k}^{(l)}\}$  образуют сложную стационарную цепь Маркова с двумя равновероятными ( $p_1^{(l)} = p_2^{(l)}$ ,  $l \in g$ ) значениями  $M_1^{(l)}$ ,  $M_2^{(l)}$  и матрицу вероятностей переходов (МПВ) по горизонтали  ${}^1\Pi = \|{}^1\pi_{ij}^{(l)}\|_{2 \times 2}$ , вертикали  ${}^2\Pi = \|{}^2\pi_{ij}^{(l)}\|_{2 \times 2}$ , кадрам  ${}^4\Pi = \|{}^4\pi_{ij}^{(l)}\|_{2 \times 2}$ .

На рис. 1 представлены два соседних  $l$ -х РДИ, разделенных на области  $F_{ik}^{(l)}$  ( $i = \overline{1,4}$ ), элементы которых являются цепью Маркова различной размерности. Алгоритмы фильтрации элементов первых трех областей известны и хорошо изучены [1–3]. Наибольшую сложность представляет алгоритм фильтрации элементов области  $F_{4k}^{(l)}$ . Фильтруемый элемент  $v_4^{(l)} = \mu_{i,j,k}^{(l)}$  области  $F_{4k}^{(l)}$  зависит от семи соседних элементов, входящих в его окрестность (рис. 2), где  $v_1^{(l)} = \mu_{i,j-1,k}^{(l)}$ ;  $v_2^{(l)} = \mu_{i-1,j,k}^{(l)}$ ;  $v_3^{(l)} = \mu_{i-1,j-1,k}^{(l)}$ ;  $v_1^{\prime(l)} = \mu_{i,j-1,k-1}^{(l)}$ ;  $v_2^{\prime(l)} = \mu_{i-1,j,k-1}^{(l)}$ ;  $v_3^{\prime(l)} = \mu_{i-1,j-1,k-1}^{(l)}$ ;  $v_4^{\prime(l)} = \mu_{i,j,k-1}^{(l)}$ .

Используя аппроксимацию последовательности РДИ трехмерной цепью Маркова с двумя равновероятными состояниями, получаем систему рекуррентных уравнений нелинейной фильтрации элементов  $l$ -го РДИ в  $k$ -м кадре вида [1–3]

$$\begin{aligned}
 u(v_4^{(l)}) &= [f(M_1(v_4^{(l)})) - f(M_2(v_4^{(l)}))] + u(v_1^{(l)}) + \\
 &+ z_1[u(v_1^{(l)}), {}^1\pi_{ij}^{(l)}] + u(v_2^{(l)}) + z_2[u(v_2^{(l)}), {}^2\pi_{ij}^{(l)}] + \\
 &+ u(v_4^{\prime(l)}) + z_3[v_4^{(l)}, {}^4\pi_{ij}^{(l)}] + u(v_3^{(l)}) + \\
 &+ z_4[u(v_3^{(l)}), {}^7\pi_{ij}^{(l)}] - u(v_3^{(l)}) - z_5[u(v_3^{(l)}), {}^3\pi_{ij}^{(l)}] - \\
 &- u(v_1^{\prime(l)}) - z_6[u^{(l)}(v_1^{\prime(l)}), {}^5\pi_{ij}^{(l)}] - u(v_2^{\prime(l)}) - \\
 &- z_7[u(v_2^{\prime(l)}), {}^6\pi_{ij}^{(l)}] \geq H, \quad (1)
 \end{aligned}$$

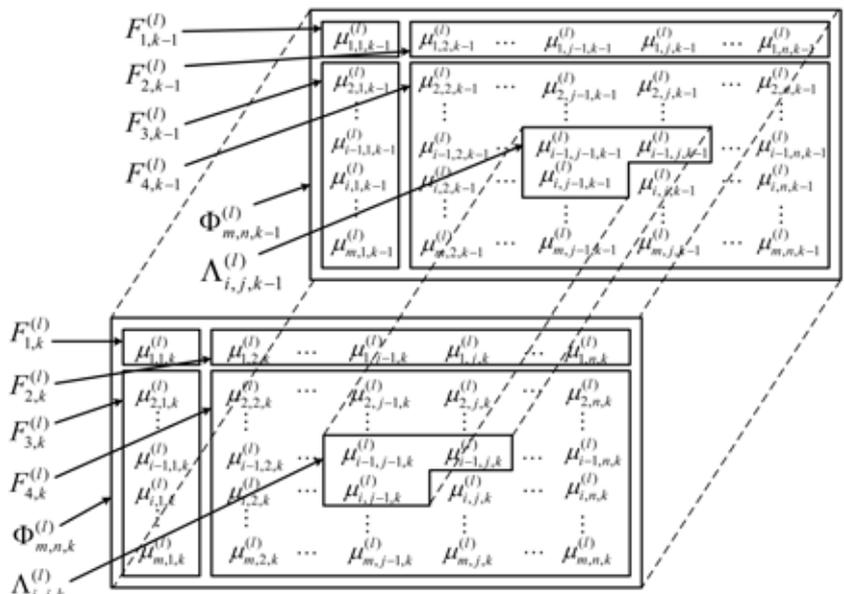


Рис. 1. Соседние кадры последовательности РДИ  $l$ -го разряда ЦПИ

где  $u(v_4^{(l)}) = \ln \frac{p_1(v_4^{(l)})}{p_2(v_4^{(l)})}$  — логарифм отношения апостериорных вероятностей значений двоичных элементов  $l$ -го РДИ в точке  $v_4^{(l)}$ ;  $[f(M_1(v_4^{(l)})) - f(M_2(v_4^{(l)}))] — разность логарифмов функций правдоподобия значений двоичных элементов  $l$ -го РДИ в элементе  $v_4$ ;  $H — порог, выбранный в соответствии с критерием идеального наблюдателя (для данного алгоритма  $H = 0$ );$$

$$z_i(\cdot) = \ln \frac{r \pi_{\alpha\alpha} + r \pi_{\beta\alpha} \exp\{-u^{(l)}(v_i^{(l)})\}}{r \pi_{\beta\beta} + r \pi_{\alpha\beta} \exp\{-u^{(l)}(v_i^{(l)})\}}; \quad (2)$$

$i = \overline{1,3}; r = \overline{1,3};$

$$z_i(\cdot) = \ln \frac{r \pi_{\alpha\alpha} + r \pi_{\beta\alpha} \exp\{-u^{(l)}(v_i^{\prime(l)})\}}{r \pi_{\beta\beta} + r \pi_{\alpha\beta} \exp\{-u^{(l)}(v_i^{\prime(l)})\}}; \quad (3)$$

$i = \overline{1,4}; r = \overline{4,7};$

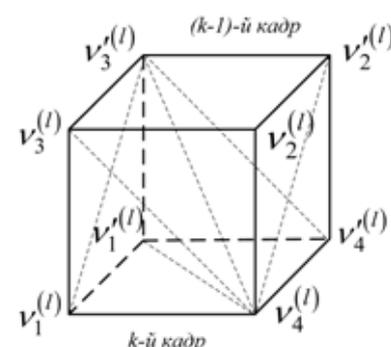


Рис. 2. Фрагмент пространственно-временной модели

$r_{\pi_{ii}} (i = \overline{1, 2}; r = \overline{1, 7})$  — элементы МВП в одномерных цепях Маркова с двумя состояниями по горизонтали  ${}^1\Pi^{(l)}$ , вертикали  ${}^2\Pi^{(l)}$ , кадрам  ${}^4\Pi^{(l)}$  последовательности  $l$ -го РДИ и сопутствующих МВП  ${}^3\Pi^{(l)} = {}^1\Pi^{(l)} \cdot {}^2\Pi^{(l)}$ ;  ${}^5\Pi^{(l)} = {}^1\Pi^{(l)} \cdot {}^4\Pi^{(l)}$ ;  ${}^6\Pi^{(l)} = {}^2\Pi^{(l)} \cdot {}^4\Pi^{(l)}$ ;  ${}^7\Pi^{(l)} = {}^3\Pi^{(l)} \cdot {}^4\Pi^{(l)} = {}^1\Pi^{(l)} \cdot {}^2\Pi^{(l)} \cdot {}^4\Pi^{(l)}$ .

Алгоритм фильтрации ВП ЦПИ состоит из  $g$  алгоритмов фильтрации РДИ.

### Алгоритм нелинейной фильтрации двух статистически связанных ВП

Синтез алгоритма фильтрации статистически связанных ВП ЦПИ ограничим синтезом алгоритма фильтрации двух статистически связанных ВП ЦПИ.

На рис. 3 представлены два соседних кадра двух статистически связанных последовательностей РДИ, разделенных на области  $F_{4,k,h}^{(l)}$ , представляющие собой одномерные, двумерные, трехмерные и четырехмерные цепи Маркова.

На рис. 4 показаны фрагменты ММ двух статистически связанных последовательностей РДИ для двух соседних позиций в пространстве.

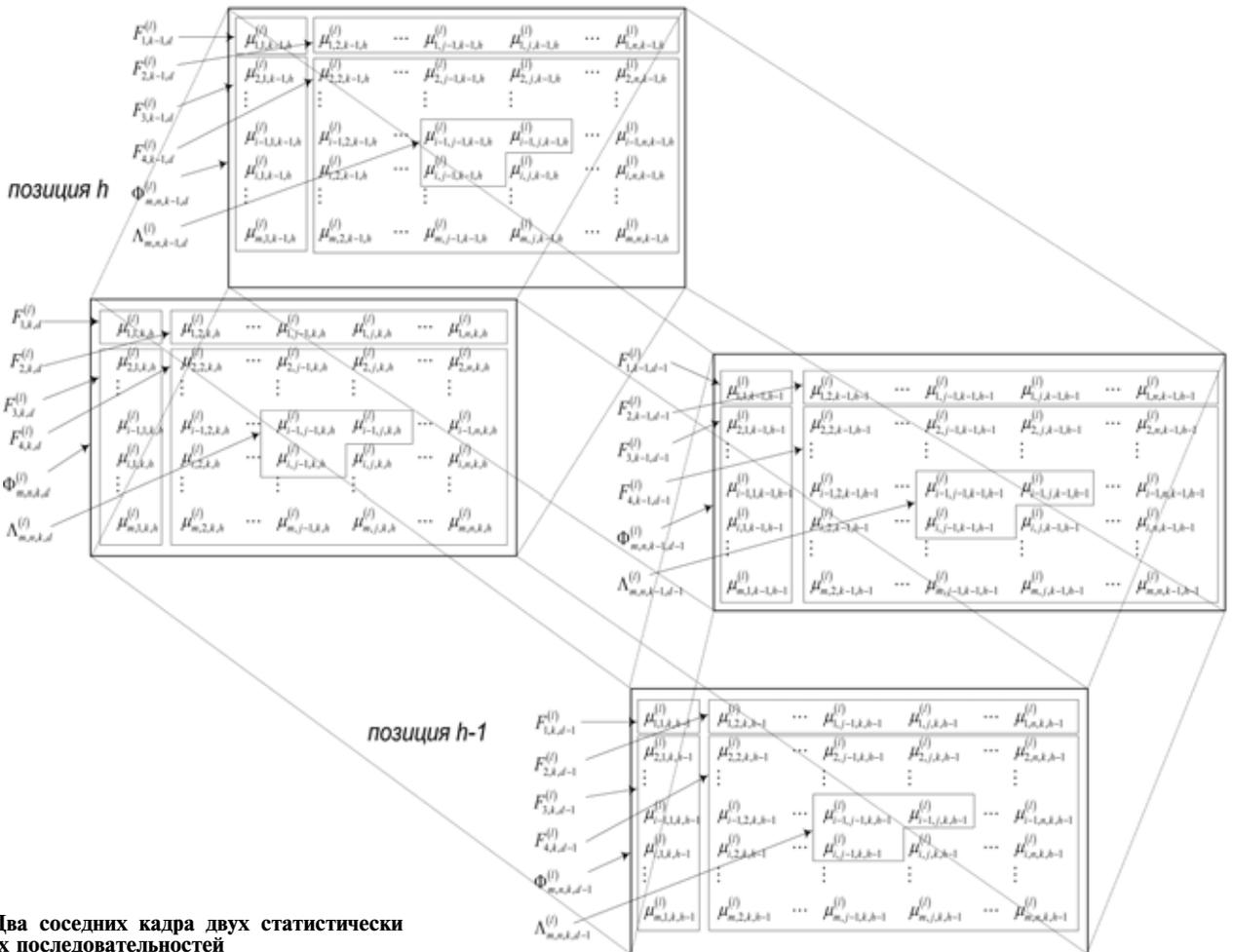


Рис. 3. Два соседних кадра двух статистически связанных последовательностей

Элементы РДИ в позиции  $h$  (рис. 4) обозначим через  $v_1^{(l)} = \mu_{i,j-1,k,h}^{(l)}$ ;  $v_2^{(l)} = \mu_{i-1,j,k,h}^{(l)}$ ;  $v_3^{(l)} = \mu_{i-1,j-1,k,h}^{(l)}$ ;  $v_4^{(l)} = \mu_{i,j,k,h}^{(l)}$ ;  $v_1^{\prime(l)} = \mu_{i,j-1,k-1,h}^{(l)}$ ;  $v_2^{\prime(l)} = \mu_{i,j-1,k-1,h}^{(l)}$ ;  $v_3^{\prime(l)} = \mu_{i-1,j-1,k-1,h}^{(l)}$ ;  $v_4^{\prime(l)} = \mu_{i,j,k-1,h}^{(l)}$ ; а элементы изображения в позиции  $h-1$  — через  $\varepsilon_1^{(l)} = \mu_{i,j-1,k,h-1}^{(l)}$ ;  $\varepsilon_2^{(l)} = \mu_{i-1,j,k,h-1}^{(l)}$ ;  $\varepsilon_3^{(l)} = \mu_{i-1,j-1,k,h-1}^{(l)}$ ;  $\varepsilon_4^{(l)} = \mu_{i,j,k,h-1}^{(l)}$ ;  $\varepsilon_1^{\prime(l)} = \mu_{i,j-1,k-1,h-1}^{(l)}$ ;  $\varepsilon_2^{\prime(l)} = \mu_{i-1,j,k-1,h-1}^{(l)}$ ;  $\varepsilon_3^{\prime(l)} = \mu_{i-1,j-1,k-1,h-1}^{(l)}$ ;  $\varepsilon_4^{\prime(l)} = \mu_{i,j,k-1,h-1}^{(l)}$ .

Фильтруемый элемент  $v_4^{(l)}$  области  $F_{4,k,h}^{(l)}$  в позиции  $h$  зависит от 15 соседних элементов, входящих в его окрестность:

$$\Lambda_{i,j,k,h}^{(l)} = (v_1^{(l)}, v_2^{(l)}, v_3^{(l)}, v_1^{\prime(l)}, v_2^{\prime(l)}, v_3^{\prime(l)}, v_4^{(l)}, \varepsilon_1^{(l)}, \varepsilon_2^{(l)}, \varepsilon_3^{(l)}, \varepsilon_4^{(l)}, \varepsilon_1^{\prime(l)}, \varepsilon_2^{\prime(l)}, \varepsilon_3^{\prime(l)}, \varepsilon_4^{\prime(l)}). \quad (4)$$

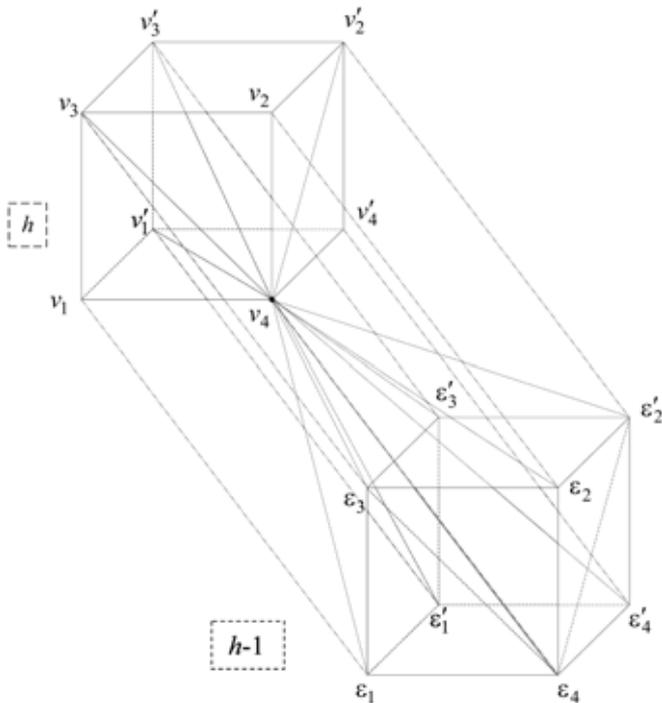


Рис. 4. Фрагмент двух статистически связанных последовательностей РДИ

Пусть  $v_4^{(l)} = \mu_{i,j,k,h}^{(l)}$  — элемент  $l$ -го РДИ четырехмерного дискретно-значного МП в  $k$ -м кадре в позиции  $h$ .

Тогда априорную многомерную плотность вероятностей значений в элементе  $v_4^{(l)}$  можно записать в виде

$$P\{\mu_{i,j,q,h}^{(l)}\} = \prod_{r=1}^h \prod_{q=1}^k \prod_{i=1}^m \prod_{j=1}^n P\{\mu_{i,j,q,r}^{(l)}\} \times w\{\mu_{i,j,q,r}^{(l)} | \mu_{i,j-1,q,r}^{(l)}, \mu_{i-1,j,q,r}^{(l)}, \mu_{i-1,j-1,q,r}^{(l)}, \mu_{i,j,q-1,r}^{(l)}, \mu_{i,j-1,q-1,r}^{(l)}, \mu_{i-1,j,q-1,r}^{(l)}, \mu_{i-1,j-1,q-1,r}^{(l)}, \mu_{i,j,q,r-1}^{(l)}, \mu_{i,j-1,q,r-1}^{(l)}, \mu_{i-1,j,q,r-1}^{(l)}, \mu_{i-1,j-1,q,r-1}^{(l)}, \mu_{i,j,q-1,r-1}^{(l)}, \mu_{i,j-1,q-1,r-1}^{(l)}, \mu_{i-1,j,q-1,r-1}^{(l)}, \mu_{i-1,j-1,q-1,r-1}^{(l)}\}. \quad (5)$$

Если  $i = j = q = r = 1$ , то  $P\{v_4^{(l)}\} = 0,5$ ;

если  $i = 1, j > 1, q = 1, r = 1$ , то  $P\{\mu_{1,j,1,1}^{(l)}\} =$

$$= P\{\mu_{1,1,1,1}^{(l)}\} \prod_{j=2}^n w\{\mu_{1,j,1,1}^{(l)} | \mu_{1,j-1,1,1}^{(l)}\};$$

если  $i > 1, j > 1, q = 1, r = 1$ , то  $P\{\mu_{i,j,1,1}^{(l)}\} =$

$$= P\{\mu_{1,1,1,1}^{(l)}\} \prod_{i=2}^m \prod_{j=2}^n w\{\mu_{i,j,1,1}^{(l)} | \mu_{i-1,j-1,1,1}^{(l)}\};$$

если  $i > 1, j > 1, q > 1, r = 1$ , то  $P\{\mu_{i,j,q,1}^{(l)}\} =$

$$= P\{\mu_{1,1,1,1}^{(l)}\} \prod_{q=2}^k \prod_{i=2}^m \prod_{j=2}^n w\{\mu_{i,j,q,1}^{(l)} | \mu_{i-1,j-1,q-1,1}^{(l)}\}.$$

Так как фильтрация осуществляется в присутствии БГШ, то функцию правдоподобия для последовательности элементов  $l$ -го РДИ можно записать в следующей форме:

$$F\{\mu_{i,j,q,r}^{(l)}\} = \exp\left\{ \prod_{r=1}^h \prod_{q=1}^k \prod_{i=1}^m \prod_{j=1}^n f(\mu_{i,j,q,r}^{(l)}) \right\}, \quad (6)$$

где  $f\{\mu_{i,j,q,r}^{(l)}\}$  — логарифм функции правдоподобия элемента  $\mu_{i,j,q,r}^{(l)}$   $l$ -го РДИ в  $k$ -м кадре позиции  $h$ .

С учетом (5), (6) апостериорная плотность вероятностей переходов значений четырехмерного двоичного МП будет иметь вид

$$p_{ac}\{\mu_{i,j,q,h}^{(l)}\} = \text{сехр}\left\{ \prod_{r=1}^h \prod_{q=1}^k \prod_{i=1}^m \prod_{j=1}^n f(\mu_{i,j,q,r}^{(l)}) \right\} \times \prod_{r=1}^h \prod_{q=1}^k \prod_{i=1}^m \prod_{j=1}^n P\{\mu_{i,j,q,r}^{(l)}\} w\{\mu_{i,j,q,r}^{(l)} | \mu_{i,j-1,q,r}^{(l)}, \mu_{i-1,j,q,r}^{(l)}, \mu_{i-1,j-1,q,r}^{(l)}, \mu_{i,j,q-1,r}^{(l)}, \mu_{i,j-1,q-1,r}^{(l)}, \mu_{i-1,j,q-1,r}^{(l)}, \mu_{i-1,j-1,q-1,r}^{(l)}, \mu_{i,j,q,r-1}^{(l)}, \mu_{i,j-1,q,r-1}^{(l)}, \mu_{i-1,j,q,r-1}^{(l)}, \mu_{i-1,j-1,q,r-1}^{(l)}, \mu_{i,j,q-1,r-1}^{(l)}, \mu_{i,j-1,q-1,r-1}^{(l)}, \mu_{i-1,j,q-1,r-1}^{(l)}, \mu_{i-1,j-1,q-1,r-1}^{(l)}\}. \quad (7)$$

Интегрируя по всем значениям  $\{\mu_{i,j,q,r}^{(l)}\}$ , с учетом обозначений, принятых на рис. 4, получим уравнение для финальной апостериорной плотности вероятностей значений  $\mu_{i,j,q,r}^{(l)}$  в элементе  $v_4^{(l)}$   $l$ -го РДИ ЦПИ в позиции  $h$ :

$$p_{ac}(v_4^{(l)}) = \text{сехр}\{f(v_4^{(l)})\} \dots \int p_{ac}(v_1^{(l)}, \dots, v_3^{(l)}, v_1'^{(l)}, \dots, v_4'^{(l)}, \varepsilon_1^{(l)}, \dots, \varepsilon_4^{(l)}, \varepsilon_1'^{(l)}, \dots, \varepsilon_4'^{(l)}) w(v_4^{(l)} | v_1^{(l)}, \dots, v_3^{(l)}, v_1'^{(l)}, \dots, v_4'^{(l)}, \varepsilon_1^{(l)}, \dots, \varepsilon_4^{(l)}, \varepsilon_1'^{(l)}, \dots, \varepsilon_4'^{(l)}) dv_1^{(l)} \dots dv_3^{(l)} dv_1'^{(l)} \dots dv_4'^{(l)} d\varepsilon_1^{(l)} \dots d\varepsilon_4^{(l)} d\varepsilon_1'^{(l)} \dots d\varepsilon_4'^{(l)}. \quad (8)$$

Непосредственно реализация уравнения затруднена вследствие многомерного характера плотностей вероятностей в правой части (8) и наличия статических связей между аргументами в них.

С учетом ММ [3] подынтегральное выражение в (8) можно представить в виде

$$\begin{aligned}
 & p_{ac}(v_1^{(l)}, \dots, v_3^{(l)}, v_1'^{(l)}, \dots, v_4'^{(l)}, \varepsilon_1^{(l)}, \dots, \varepsilon_4^{(l)}, \\
 & \varepsilon_1'^{(l)}, \dots, \varepsilon_4'^{(l)}) w(v_4^{(l)} | v_1^{(l)}, \dots, v_3^{(l)}, v_1'^{(l)}, \dots, v_4'^{(l)}, \\
 & \varepsilon_1^{(l)}, \dots, \varepsilon_4^{(l)}, \varepsilon_1'^{(l)}, \dots, \varepsilon_4'^{(l)}) = \\
 & = \frac{\prod_{i=1}^2 p(v_i^{(l)}) w(v_4^{(l)} | v_i^{(l)}) \times \prod_{i=3}^4 p(v_i^{(l)}) w(v_4^{(l)} | v_i^{(l)})}{p(v_3^{(l)}) w(v_4^{(l)} | v_3^{(l)}) \times \prod_{i=1}^2 p(v_i^{(l)}) w(v_4^{(l)} | v_i^{(l)})} \times \\
 & \times \frac{\prod_{i=3}^4 p(\varepsilon_i^{(l)}) w(v_4^{(l)} | \varepsilon_i^{(l)}) \times \prod_{i=1}^2 p(\varepsilon_i'^{(l)}) w(v_4^{(l)} | \varepsilon_i'^{(l)})}{\prod_{i=1}^2 p(\varepsilon_i^{(l)}) w(v_4^{(l)} | \varepsilon_i^{(l)}) \times \prod_{i=3}^4 p(\varepsilon_i'^{(l)}) w(v_4^{(l)} | \varepsilon_i'^{(l)})}. \quad (9)
 \end{aligned}$$

Подставив (9) в (8), получим уравнение для финальной апостериорной плотности вероятностей значения  $v_4^{(l)}$  двух связанных  $l$ -х РДИ:

$$\begin{aligned}
 & p_{ac}(v_4^{(l)}) = c \exp\{f(v_4^{(l)})\} \dots \\
 & \dots \int \frac{\prod_{i=1}^2 p(v_i^{(l)}) w(v_4^{(l)} | v_i^{(l)}) \times \prod_{i=3}^4 p(v_i^{(l)}) w(v_4^{(l)} | v_i^{(l)})}{p(v_3^{(l)}) w(v_4^{(l)} | v_3^{(l)}) \times \prod_{i=1}^2 p(v_i^{(l)}) w(v_4^{(l)} | v_i^{(l)})} \times \\
 & \times \frac{\prod_{i=3}^4 p(\varepsilon_i^{(l)}) w(v_4^{(l)} | \varepsilon_i^{(l)}) \times \prod_{i=1}^2 p(\varepsilon_i'^{(l)}) w(v_4^{(l)} | \varepsilon_i'^{(l)})}{\prod_{i=1}^2 p(\varepsilon_i^{(l)}) w(v_4^{(l)} | \varepsilon_i^{(l)}) \times \prod_{i=3}^4 p(\varepsilon_i'^{(l)}) w(v_4^{(l)} | \varepsilon_i'^{(l)})} \times \\
 & \times dv_1^{(l)} \dots dv_3^{(l)} dv_1'^{(l)} \dots dv_4'^{(l)} d\varepsilon_1^{(l)} \dots \\
 & \dots d\varepsilon_4^{(l)} d\varepsilon_1'^{(l)} \dots d\varepsilon_4'^{(l)}. \quad (10)
 \end{aligned}$$

Представим апостериорную плотность вероятностей и плотность вероятностей переходов в (10) как

$$\begin{aligned}
 & p_{ac}(v_z^{(l)}) = \sum_{\alpha=1}^2 p_{\alpha}(v_z^{(l)}) \delta(v_z^{(l)} - M_{\alpha}^{(l)}); \\
 & p_{ac}(v_z'^{(l)}) = \sum_{\gamma=1}^2 p_{\gamma}(v_z'^{(l)}) \delta(v_z'^{(l)} - M_{\gamma}^{(l)}); \\
 & p_{ac}(\varepsilon_z^{(l)}) = \sum_{\alpha=1}^2 p_z(\varepsilon_z^{(l)}) \delta(\varepsilon_z^{(l)} - M_{\alpha}^{(l)}); \\
 & p_{ac}(\varepsilon_z'^{(l)}) = \sum_{\gamma=1}^2 p_{\gamma}(\varepsilon_z'^{(l)}) \delta(\varepsilon_z'^{(l)} - M_{\gamma}^{(l)}); \\
 & z = \overline{1, 4}; \\
 & w(v_4^{(l)} | v_s^{(l)}) = \sum_{\beta=1}^2 r_{\pi_{\alpha\beta}^{(l)}} \delta(v_4^{(l)} - M_{\beta}^{(l)}); \\
 & s = \overline{1, 3}; r = \overline{1, 3}; \alpha, \beta = 1, 2;
 \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned}
 & w(v_4^{(l)} | v_v'^{(l)}) = \sum_{\vartheta=1}^2 r_{\pi_{\alpha\vartheta}^{(l)}} \delta(v_4^{(l)} - M_{\vartheta}^{(l)}); \\
 & v = \overline{1, 4}; r = \overline{4, 7}; \alpha, \vartheta = 1, 2; \\
 & w(v_4^{(l)} | \varepsilon_s^{(l)}) = \sum_{\beta=1}^2 r_{\pi_{\alpha\beta}^{(l)}} \delta(v_4^{(l)} - M_{\beta}^{(l)}); \\
 & s = \overline{1, 4}; r = 8, 9, 13, 14; \alpha, \beta = 1, 2; \\
 & w(v_4^{(l)} | \varepsilon_v'^{(l)}) = \sum_{\vartheta=1}^2 r_{\pi_{\alpha\vartheta}^{(l)}} \delta(v_4^{(l)} - M_{\vartheta}^{(l)}); \\
 & v = \overline{1, 4}; r = 10, 12, 15; \alpha, \vartheta = 1, 2,
 \end{aligned}$$

где  $p_{\alpha}(v_z^{(l)})$  — апостериорная вероятность значения  $M_{\alpha}^{(l)}$  в элементе  $v_4^{(l)}$   $l$ -го РДИ в  $k$ -м кадре;  $p_{\gamma}(v_z'^{(l)})$  — апостериорная вероятность значения  $M_{\alpha}^{(l)}$  в элементе  $v_q'^{(l)}$   $l$ -го РДИ в  $(k-1)$ -м кадре в позиции  $h$ ;  $p_z(\varepsilon_z^{(l)})$  и  $p_z(\varepsilon_z'^{(l)})$  — соответствующие апостериорные вероятности в позиции  $(h-1)$ ;  $r_{\pi_{\alpha\beta}^{(l)}}$  — вероятность перехода от значения  $M_{\alpha}^{(l)}$  к значению  $M_{\beta}^{(l)}$  в соседних по отношению к  $v_4^{(l)}$  элементах;  $\delta(\cdot)$  — дельта-функция.

Подставив (12), (11) в (10), проинтегрировав с дельта-функциями и приравняв коэффициенты слева и справа при одинаковых дельта-функциях, получим уравнение для финальной апостериорной вероятности значения двоичного элемента  $v_4^{(l)}$ :

$$\begin{aligned}
 & p_{\beta}(v_4^{(l)}) = c \exp\{f(M_{\beta}(v_4^{(l)}))\} \times \\
 & \times \frac{p_{\alpha}(v_1^{(l)}) ({}^1\pi_{\alpha\beta}^{(l)}) p_{\theta}(v_2^{(l)}) ({}^2\pi_{\theta\beta}^{(l)}) p_{\gamma}(v_2^{(l)}) ({}^4\pi_{\gamma\beta}^{(l)})}{p_{\varphi}(v_3^{(l)}) ({}^3\pi_{\varphi\beta}^{(l)}) p_{\psi}(v_1'^{(l)}) ({}^5\pi_{\psi\beta}^{(l)})} \times \\
 & \times \frac{p_{\omega}(v_3^{(l)}) ({}^7\pi_{\omega\beta}^{(l)}) p_{\phi}(\varepsilon_4^{(l)}) ({}^8\pi_{\phi\beta}^{(l)}) p_{\tau}(\varepsilon_1^{(l)}) ({}^{10}\pi_{\tau\beta}^{(l)}) p_{\kappa}(\varepsilon_3^{(l)}) ({}^9\pi_{\kappa\beta}^{(l)})}{p_v(v_2^{(l)}) ({}^6\pi_{v\beta}^{(l)}) p_{\mu}(\varepsilon_4'^{(l)}) ({}^{15}\pi_{\mu\beta}^{(l)}) p_{\rho}(\varepsilon_1^{(l)}) ({}^{13}\pi_{\rho\beta}^{(l)}) p_{\zeta}(\varepsilon_2^{(l)}) ({}^{14}\pi_{\zeta\beta}^{(l)})} \times \\
 & \times \frac{p_{\lambda}(\varepsilon_2'^{(l)}) ({}^{11}\pi_{\lambda\beta}^{(l)})}{p_{\rho}'(\varepsilon_3'^{(l)}) ({}^{12}\pi_{\rho\beta}^{(l)})}; \\
 & \alpha, \beta, \theta, \varphi, \gamma, \omega, \psi, \phi, v, \mu, \tau, \kappa, \lambda, \rho = \overline{1, 2}. \quad (13)
 \end{aligned}$$

Разделив уравнение (13) при  $\beta = 1$  на уравнение при  $\beta = 2$  и прологарифмировав слева и справа, получим рекуррентный алгоритм нелинейной фильтрации двоичных элементов двух статистически связанных  $l$ -последовательностей:

$$\begin{aligned}
 & u(v_4^{(l)}) = [f(M_1(v_4^{(l)})) - f(M_2(v_4^{(l)}))] + \\
 & + \sum_{\alpha=1}^8 (u_{\alpha} + z_{\alpha}) - \sum_{\alpha=9}^{15} (u_{\alpha} + z_{\alpha}) \geq H, \quad (14)
 \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned}
 u_\alpha &= u(v_\alpha^{(l)}), \alpha = 1, 2; u_\alpha = u(v_\alpha'^{(l)}), \alpha = 3, 4; \\
 u_\alpha &= u(\varepsilon_3^{(l)}), \alpha = 5; u_\alpha = u(\varepsilon_4^{(l)}), \alpha = 6; \\
 u_\alpha &= u(\varepsilon_1'^{(l)}), \alpha = 7; u_\alpha = u(\varepsilon_2'^{(l)}), \alpha = 8; \\
 u_\alpha &= u(v_3^{(l)}), \alpha = 9; u_\alpha = u(v_1'^{(l)}), \alpha = 10; \\
 u_\alpha &= u(v_2'^{(l)}), \alpha = 11; u_\alpha = u(\varepsilon_1^{(l)}), \alpha = 12; \\
 u_\alpha &= u(\varepsilon_2^{(l)}), \alpha = 13, u_\alpha = u(\varepsilon_3'^{(l)}), \alpha = 14; \\
 u_\alpha &= u(\varepsilon_4'^{(l)}), \alpha = 15, \\
 z_\alpha &= \ln \frac{r\pi_{\alpha\alpha}^{(l)} + r\pi_{\beta\alpha}^{(l)} \exp\{-u_i\}}{r\pi_{\beta\beta}^{(l)} + r\pi_{\alpha\beta}^{(l)} \exp\{u_i\}}, \quad (15)
 \end{aligned}$$

где  $\pi_{\alpha\alpha}, \pi_{\beta\alpha}, \pi_{\beta\beta}, \pi_{\alpha\beta}$  — оценки элементов МВП в одномерных цепях Маркова с двумя состояниями по горизонтали  ${}^1\Pi^{(l)}$ , вертикали  ${}^2\Pi^{(l)}$ , кадрам  ${}^4\Pi^{(l)}$ , от позиции к позиции  ${}^8\Pi^{(l)}$  и сопутствующих МВП:

$$\begin{aligned}
 {}^3\Pi^{(l)} &= {}^1\Pi^{(l)} \times {}^2\Pi^{(l)}, {}^5\Pi^{(l)} = {}^1\Pi^{(l)} \times {}^4\Pi^{(l)}, \\
 {}^6\Pi^{(l)} &= {}^2\Pi^{(l)} \times {}^4\Pi^{(l)}, {}^7\Pi^{(l)} = {}^3\Pi^{(l)} \times {}^5\Pi^{(l)}, \\
 {}^9\Pi^{(l)} &= {}^3\Pi^{(l)} \times {}^8\Pi^{(l)}, {}^{10}\Pi^{(l)} = {}^5\Pi^{(l)} \times {}^8\Pi^{(l)}, \\
 {}^{11}\Pi^{(l)} &= {}^6\Pi^{(l)} \times {}^8\Pi^{(l)}, {}^{12}\Pi^{(l)} = {}^7\Pi^{(l)} \times {}^8\Pi^{(l)}, \\
 {}^{13}\Pi^{(l)} &= {}^1\Pi^{(l)} \times {}^8\Pi^{(l)}, {}^{14}\Pi^{(l)} = {}^2\Pi^{(l)} \times {}^8\Pi^{(l)}, \\
 {}^{15}\Pi^{(l)} &= {}^4\Pi^{(l)} \times {}^8\Pi^{(l)};
 \end{aligned}$$

для  $i = 1 r = 1$ ; для  $i = 2 r = 2$ ; для  $i = 3 r = 7$ ; для  $i = 4 r = 4$ ; для  $i = 5 r = 9$ ; для  $i = 6 r = 8$ ; для

$i = 7 r = 10$ ; для  $i = 8 r = 11$ ; для  $i = 9 r = 3$ ; для  $i = 10 r = 5$ ; для  $i = 11 r = 6$ ; для  $i = 12 r = 13$ ; для  $i = 13 r = 14$ ; для  $i = 14 r = 12$ ; для  $i = 15 r = 15$ .

Алгоритм фильтрации двух статистически связанных ВП ЦПИ содержит  $g$  алгоритмов фильтрации.

### Результаты моделирования нелинейной фильтрации статистически связанных ВП ЦПИ

Процесс нелинейной фильтрации исследовался на двух искусственных взаимосвязанных последовательностях ЦПИ из 15 кадров размером  $710 \times 320$  элементов с вероятностями переходов:

$$\begin{aligned}
 1\pi_{ii}^{(1)} &= 0,51; 2\pi_{ii}^{(1)} = 0,50; 1\pi_{ii}^{(2)} = 0,54; \\
 2\pi_{ii}^{(2)} &= 0,52; 1\pi_{ii}^{(3)} = 0,58; 2\pi_{ii}^{(3)} = 0,55; \\
 1\pi_{ii}^{(4)} &= 0,64; 2\pi_{ii}^{(4)} = 0,60; 1\pi_{ii}^{(5)} = 0,71; \\
 2\pi_{ii}^{(5)} &= 0,68; 1\pi_{ii}^{(6)} = 0,81; 2\pi_{ii}^{(6)} = 0,78; \\
 1\pi_{ii}^{(7)} &= 0,87; 2\pi_{ii}^{(7)} = 0,85; 1\pi_{ii}^{(8)} = 0,96; \\
 2\pi_{ii}^{(8)} &= 0,95.
 \end{aligned}$$

Элементы МВП  ${}^4\Pi^{(l)}$  и  ${}^8\Pi^{(l)}$  для всех  $l (l \in g)$  взяты одинаковыми:  ${}^4\pi_{ii}^{(l)} = {}^8\pi_{ii}^{(l)} = 0,98$ .

На рис. 5 показан процесс нелинейной фильтрации двух статистически связанных малоинформационных ВП ЦПИ "Spacecraft", зашумленных БГШ. На рис. 5, а приведен один кадр реальной

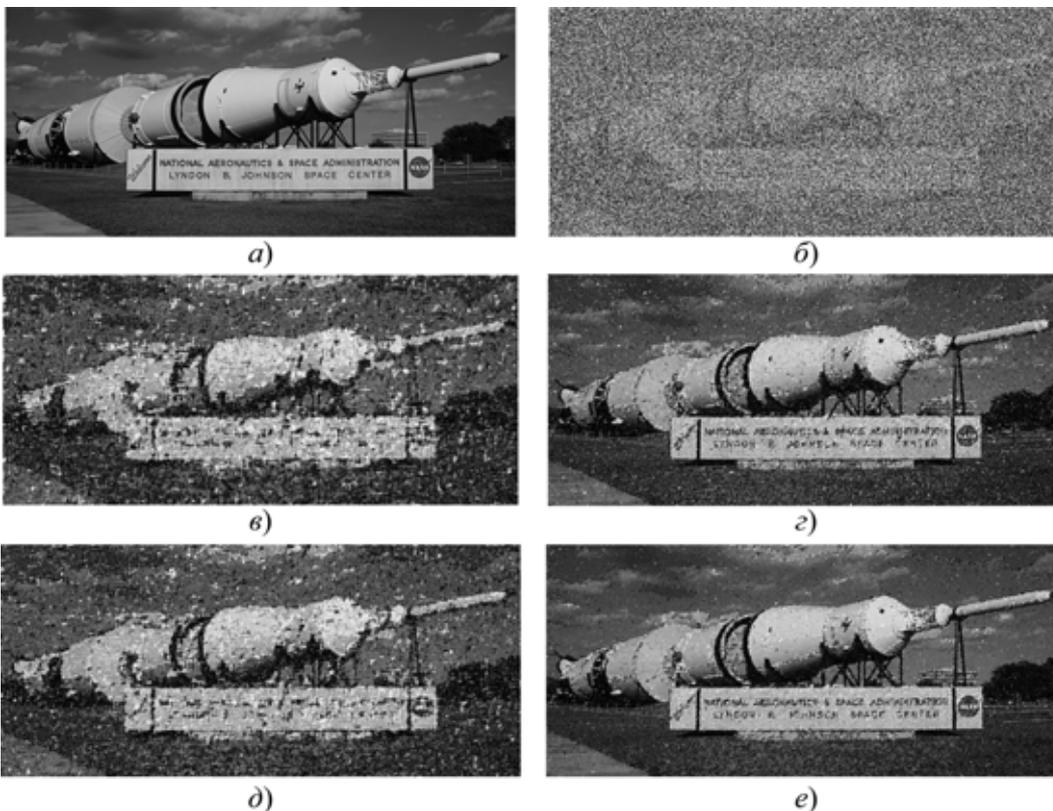


Рис. 5. Нелинейная фильтрация двух статистически связанных ВП ЦПИ

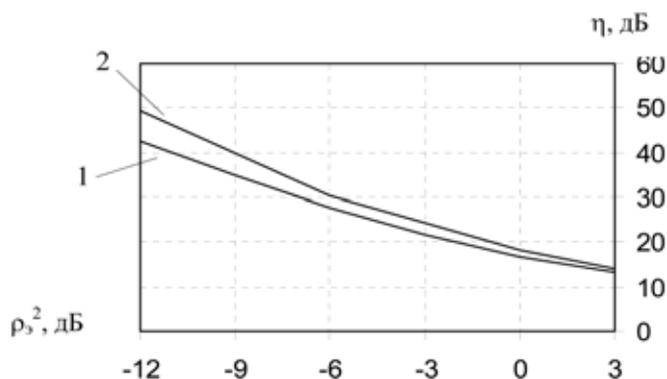


Рис. 6. Выигрыш по мощности сигнала  $\eta$  при трехмерной (1) и четырехмерной (2) фильтрации 8-разрядных ЦПИ

ВП, а на рис. 5, б — изображение, зашумленное БГШ, при отношении сигнал—шум по мощности сигнала  $\rho_3^2 = -15$  дБ. На рис. 5, в, г представлены отфильтрованные 1-й, 15-й кадры первой ВП, а на рис. 5, д, е — отфильтрованные 1-й, 5-й кадры второй ВП с учетом первой ВП.

Анализ изображений на рис. 5 показывает, что уже 5-й кадр второй ВП, статистически связанной с первой, имеет более высокое визуальное качество, чем 15-й кадр первой ВП. Таким образом, вторая ВП с учетом первой восстанавливается быстрее (за меньшее число кадров), чем первая ВП при одинаковом отношении сигнал—шум.

Качество фильтрации определялось объективной оценкой выигрыша по мощности сигнала:

$$\eta^{(l)} = 10 \lg(\rho_{3, \text{вых}}^2 / \rho_3^2), \quad (16)$$

где  $\rho_3^2$ ,  $\rho_{3, \text{вых}}^2$  — отношение сигнал—шум по мощности сигнала в элементе  $l$ -го РДИ на входе и выходе устройства фильтрации. Отношение сигнал—шум на входе  $\rho_3^2$  априорно принято одинаковым для всех  $g$  РДИ, а  $\rho_{3, \text{вых}}^2$  определяется по средней ошибке различения двоичных элементов  $l$ -го РДИ и имеет различное значение для всех  $g$  РДИ.

На рис. 6 показан выигрыш  $\eta$  по мощности сигнала при трех- и четырехмерной фильтрации ВП ЦПИ "Spacecraft" для различных  $\rho_3^2$ .

Анализ результатов фильтрации (рис. 6) свидетельствует о более высокой эффективности четырехмерной фильтрации по сравнению с трехмерной. Использование статистической избыточности между двумя ВП ЦПИ позволяет получить выигрыш до 6—7 дБ.

Синтезированные алгоритмы требуют для своей реализации небольшие вычислительные ресурсы и могут быть применены при фильтрации статистически связанных ВП, полученных, например, при съемке одних и тех же сцен с разных позиций.

#### Список литературы

1. Петров Е. П., Трубин И. С. Математические модели видеопоследовательностей цифровых полутоновых изображений // Успехи современной радиоэлектроники. 2007. № 6. С. 3—31.
2. Трубин И. С., Медведева Е. В., Булыгина О. П. Метод моделирования цифровых полутоновых изображений // Инфокоммуникационные технологии. 2008. Т. 6. № 1. С. 94—99.
3. Трубин И. С., Медведева Е. В., Булыгина О. П. Нелинейная фильтрация видеопоследовательностей цифровых полутоновых изображений // Инфокоммуникационные технологии. 2007. Т. 5. № 4. С. 29—35.

УДК 004.932.72'1

А. А. Копцов, аспирант, e-mail: putmail@inbox.ru, Ю. Н. Пронкин, канд. физ.-мат. наук, доц., e-mail: yrbox@inbox.ru, МГУ им. М. В. Ломоносова

## Об одном новом методе обнаружения объектов

Данная работа посвящена новым методам обнаружения объектов на кадрах видеопотока. Приводится математическое описание подхода, использующего фоновые кадры и принципиально отличного от обычно применяемых для обнаружения объектов разностных методов. Основное преимущество предлагаемой модели перед разностными алгоритмами состоит в меньшей зависимости качества обнаружения объектов от возможной смены освещенности, посторонних флуктуаций (колеблющиеся листья, осадки, шумы камеры и другие подобные им эффекты), а также прочих факторов, осложняющих решение задачи обнаружения. Проведен сравнительный анализ эффективности нового алгоритма и традиционных фоновно-разностных методов детекции.

**Ключевые слова:** обнаружение объектов, системы визуального наблюдения, алгоритмы обработки видео с использованием фона, отделение объектов от фона

### История вопроса

В настоящее время практически во всех комплексах визуального наблюдения имеются встроенные алгоритмы, реагирующие на появление и

исчезновение объектов в поле кадра. Объясняется это, в частности, тем обстоятельством, что у оператора, как части системы обнаружения объектов, уже после непродолжительного наблюдения за

изображениями с нескольких камер заметно притупляется внимание. В этом случае даже минимальная помощь со стороны самого комплекса может значительно повысить эффективность работы всей системы обнаружения.

В дополнение к отмеченному использование подобных алгоритмов позволяет вести запись в архив не всего видеопотока, а лишь его ключевых эпизодов, а именно тех, где действительно была замечена интересующая активность. Объем видеoarхива при такой записи значительно уменьшается, что дает возможность экономить дорогостоящие аппаратные ресурсы (дисковое пространство). Таким образом, не требуя дополнительных затрат на оборудование, подобная система могла бы значительно оптимизировать работу любого комплекса визуального наблюдения — будь то система охраны периметра или установка для мониторинга нарушений правил дорожного движения.

Необходимо отметить, что попытки автоматизации процессов обнаружения объектов осуществляются с самого появления таких комплексов. Более подробно с результатами, достигнутыми в этой области, можно ознакомиться по работам [1—3].

### Понятие о фоне и поведении пикселей для пары кадров

Под *объектом* в контексте данной работы понимается небольшое (в масштабе кадра) связное множество пикселей, ведущих себя нехарактерным для основного числа кадровых точек образом. Используя данное определение объекта, получим, что фоном следует считать основную часть кадра с характерным регулярным поведением пикселей.

Прежде всего условимся, что следует понимать под поведением пикселей, упомянутом в предыдущем определении объекта.

Пусть есть пара кадров одинакового размера:  $I_1$  и  $I_2$ . Рассмотрим попиксельное отображение  $T: I_1 \rightarrow I_2$ . При фиксированных координатах пикселя  $(x, y)$  получившееся отображение  $T_{(x, y)}: U \rightarrow U$  будем называть поведением пикселя из кадра  $I_1$  при переходе от  $I_1$  к  $I_2$ .

Поскольку согласно данному выше определению фон должен вести себя характерным образом, то для фоновых пикселей эти функции будут иметь схожий вид. Этот факт означает, что основная часть фоновых пикселей одного цвета при движении во времени ведет себя схожим образом — переходит в пиксели, близкие по цвету. При постоянной освещенности, а также при отсутствии цветных флуктуаций и объектов все они будут переходить в пиксели того же самого цвета.

### Работа алгоритма на паре кадров. Гистограмма переходов

Пусть есть два кадра видеопотока, про объекты на которых заранее ничего не известно. На основе данных о поведении всех точек при переходе от первого кадра ко второму можно попытаться по этой паре кадров для каждого пикселя понять, ведет ли он себя как фон. Данные по статистике поведения предлагается получить, используя следующие соображения. Переход определяется парой из начального и конечного цветов  $(C_1, C_2)$ . Как следствие, нужно рассмотреть все такие пары и каждой из них сопоставить число переходов для заданных двух кадров. Результат может быть представлен в виде двумерной матрицы  $\mathbf{M}$ , размерность которой  $\|U\| \times \|U\|$ , где  $\|U\|$  — мощность используемого цветового пространства. В ячейке  $\mathbf{M}_{(C_1, C_2)}$  с координатами  $(C_1, C_2)$  содержится число пикселей, перешедших от цвета  $C_1$  к цвету  $C_2$ . Эта матрица по сути является гистограммой, построенной на множестве всех переходов между цветами пикселей выбранных кадров.

Пусть координата  $C_1$  фиксирована. Тогда рассмотрим значения в одной строке (или одном столбце, однако для определенности будем считать, что фиксированному  $C_1$  соответствует строка) этой матрицы для всех пар  $(C_1, C_2)$ . Если оперировать в терминах дискретных вероятностей по этому кадру, то значение в любой ее ячейке  $\mathbf{M}_{(C_1, C_2)}$  равно числу пикселей, перешедших от цвета  $C_1$  к цвету  $C_2$ , или вероятности принять на первом кадре цвет  $C_1$ , а на втором  $C_2$ , умноженной на  $N$  — общее число пикселей в кадре:

$$P(C(I_1) = C_1, C(I_2) = C_2)N.$$

По определению условной вероятности,

$$P(C(I_1) = C_1, C(I_2) = C_2) = P(C(I_2) = C_2 | C(I_1) = C_1)P(C(I_1) = C_1).$$

Таким образом,

$$P(C(I_2) = C_2 | C(I_1) = C_1) = \frac{P(C(I_1) = C_1, C(I_2) = C_2)}{P(C(I_1) = C_1)}.$$

Рассмотрим величину в знаменателе. Она равна числу пикселей кадра  $I_1$ , имеющих цвет  $C_1$ , отнесенному к общему числу пикселей  $I_1$ . Вместе с тем, как нетрудно заметить, общее число пикселей, имеющих цвет  $C_1$  на кадре  $I_1$ , равно:

$$N_{C_1} = P(C I_1) = C_1 N = \sum_{C_2} \mathbf{M}_{(C_1, C_2)},$$

т. е. сумме по всем ячейкам матрицы  $\mathbf{M}$  с фиксированной координатой  $C_1$  (здесь и далее  $C'_2$  под

знаком суммы означает индекс суммирования, который принимает все значения из  $\|U\|$ ). Таким образом, для условной вероятности пикселя иметь цвет  $C_2$  на кадре  $I_2$  при условии, что на кадре  $I_1$  он имеет цвет  $C_1$ , можно получить следующее выражение:

$$P(C(I_2) = C_2 | C(I_1) = C_1) = \frac{P(C(I_1) = C_1, C(I_2) = C_2)N}{P(C(I_1) = C_1)N} = \frac{\mathbf{M}_{(C_1, C_2)}}{\sum_{C_2'} \mathbf{M}_{(C_1, C_2')}}. \quad (1)$$

Фактически значение этого выражения совпадает со значением в соответствующей ячейке матрицы  $\mathbf{M}$  после нормировки ее по строке. Чтобы не зависеть от фактического числа пикселей разных цветов в кадре, следует проделать эту операцию (нормировку по строкам) со всеми элементами матрицы  $\mathbf{M}$ . Полученная матрица  $\hat{\mathbf{M}}$  будет в точности состоять из описанных выше условных вероятностей, т. е.

$$\hat{\mathbf{M}}_{(C_1, C_2)} = \frac{\mathbf{M}_{(C_1, C_2)}}{\sum_{C_2'} \mathbf{M}_{(C_1, C_2')}} = P(C_2 | C_1).$$

Здесь следует дополнительно отметить один важный факт. Пусть у нас есть набор пар цифровых фотографий одной и той же сцены. Предположим, что всякая последующая пара имеет более высокое разрешение, но все они обладают одинаковой цветопередачей. Это означает, что каждая следующая пара кадров лучше приближает "настоящую" пару картинок — два непрерывных поля разрывной функции цвета. Если к тому же считать, что функция цветопередачи также неограниченно точна, т. е. непрерывна, то в качестве  $\mathbf{M}$  получается матрица с непрерывными коэффициентами, а в качестве  $P(C_2 | C_1)$  — функция цвета как непрерывного аргумента. Фактически полученная функция  $P(C_2 | C_1) = \rho_{C_1}(C_2)$  будет плотностью вероятности для пикселя с цветом  $C_1$  иметь цвет  $C_2$ . С учетом изложенного какую-то оценку этой истинной плотности (однако лишь на конечном множестве яркостей) мы и получаем, когда строим дискретную гистограмму, согласно описанному выше подходу.

В теоретическом плане увеличение точности цветопередачи должно было бы дать лучшую оценку плотности вероятности. Вместе с тем, если конечное число точек в кадре будет мало относительно конечного числа точек в матрице  $\mathbf{M}$ , то последняя окажется слабо заполненной. Этот факт означает, что при увеличении точности цветопередачи при фиксированной выборке пикселей число пикселей каждого цвета не станет больше,

если их цвет был правильно определен ранее. В том случае, если их цвет на самом деле лучше оценивается каким-то из вновь введенных цветов, число таких пикселей станет меньше. Таким образом, они перейдут в относящееся к этому цвету новое множество. С учетом изложенного можно заключить, что в первом случае не появится никакой новой информации об уже имеющихся пикселях, а во втором — оценка для старого цвета будет получена с уменьшенной выборкой. Такого рода изменения могут привести к потере характерности поведения, что в приведенной выше постановке задачи снижает возможности данного метода.

Таким образом, рассматриваемый подход предполагает, что каждый имеющийся в гистограмме цвет представлен на кадре в значительном количестве, потому что только при достаточной выборке можно получить приемлемую оценку плотности распределения пикселей этого цвета на текущем кадре по цветам на опорном кадре. При небольшом разрешении кадров видеопотока имеет смысл скорее ухудшить цветопередачу. В этом случае некоторые значения цвета объединяются в целях увеличения выборки редко встречающихся цветов (как правило, очень ярких), с тем чтобы обеспечить большую заполненность гистограммы.

Условие, которое налагается на баланс цветопередачи и разрешение, фактически не накладывает ограничений на использование предложенного алгоритма в практических целях. Во-первых, из "хорошего" кадра всегда можно сделать "плохой" (например, переводом из цветного в монохромный), а во-вторых, это позволяет использовать более примитивные камеры и сжатие изображений для передачи данных по сети. Как одно, так и другое дает определенные преимущества в стоимостном выражении и в плане использования аппаратных средств.

#### Функциональность модели видеопотока. Возможные ошибки

Пусть есть заданный опорный кадр из реального видео с фоном. Тогда для каждого вновь пришедшего кадра видеопотока строится двумерная гистограмма переходов в виде описанной выше матрицы  $\mathbf{M}$ , которая затем нормируется по строкам (или по столбцам, в зависимости от того, что из них соответствует фиксированной координате  $C_1$ ). После этого для каждого пикселя, зная его поведение, а именно — цвет на опорном и текущем кадрах, можно судить о вероятности для него иметь фоновое поведение на этой паре кадров. Таким образом, результатом работы рассматриваемого метода является поле вероятностей  $P(x, y)$ , совпадающее по размерам с кадром видеопотока. Значения в его ячейках будут вероятно-

стями соответствующих пикселей текущего кадра иметь фоновое поведение (уравнение (1))

$$P(x, y) = P(C(I_2(x, y)|C(I_1(x, y))) = \frac{M_{(C_1, C_2)}}{\sum_{C_2'} M_{(C_1, C_2')}})$$

при сравнении именно с этим опорным кадром в качестве фона. Затем можно провести, например, пороговую обработку [4, стр. 180], с тем чтобы отделить движение в самом фоне от интересных нерегулярностей поведения. Таким образом, получившееся изображение преобразуется в битовую карту, которая и будет содержать пиксели объектов.

Предложенный подход вновь предполагает, что в качестве опорного кадра имеется готовый фон. Однако в практических задачах это не так, поскольку фоновый кадр либо генерируется автоматически по уже обработанному фрагменту видеопотока, либо должен быть изготовлен вручную. Последний вариант при наличии комплекса из нескольких десятков камер, которые могут регулярно (или даже непрерывно) менять свое положение, не представляется возможным для реализации на практике.

Чтобы ответить на вопрос, почему нельзя использовать произвольный кадр видеопотока в качестве опорного, необходимо показать, к каким видам ошибок при составлении карты объектов может привести наличие объекта в кадре с фоном. Первая из таких ошибок — ложное срабатывание (*False Positive*) — возникает, если этот же объект отсутствует в текущем проверяемом кадре. В таком случае именно зона, соответствующая объекту на фоновом кадре, демонстрирует нерегулярное поведение и будет "обнаружена" по причине отсутствия этого объекта на текущем кадре. Вторая ошибка — потеря объекта (*False Negative*). Пусть объект имеется как на текущем, так и на опорном кадре, в одном и том же месте. Тогда возможны два варианта принятия решения. Если цвет объекта совпадает с цветом области фона на кадре и сцена относительно статична, то переход этого цвета в близкий к самому себе и будет характерным поведением. Это означает, что объект потеряется. Но если цвет объекта не совпадает с фоном ни в каком месте сцены, то все пиксели такого же цвета принадлежат объектам. Тогда та их часть, которая переходит в близкие к текущему цвету, относительно велика. По этой причине объект, вероятнее всего, тоже потеряется. Кроме того, данный факт повлияет на обнаружение других объектов. Если же объект не находится в одном и том же месте, а перекрывается сам с собой на паре кадров, то он потеряется не полностью, однако форма его будет искажена.

Окончательная ситуация выглядит следующим образом: произвольный кадр видеопотока при использовании в качестве опорного в данном алгоритме не может обеспечить стабильного качества нахождения объектов. По этой причине опорный кадр нужно строить автоматически и с учетом компенсации возможно имеющихся на нем объектов.

### Работа с предысторией. Введение решающего правила

Как следует из приведенного выше рассуждения, задача автоматизации процесса детекции сводится к задаче построения опорного кадра. Если зафиксировать текущий проверяемый кадр и взять несколько других в качестве возможных опорных, то по каждому из них можно построить для первого кадра матрицу  $\bar{M}$ , которая по строкам представляет собой матрицу  $M$ . Этот факт означает, что при неизменном качестве цветопередачи имеется выборка значений каждой из вероятностей  $P(C_2|C_1)$ . Дальнейшее рассмотрение будет вестись для фиксированной пары цветов  $C_1'$  и  $C_2'$ . Соответствующие вероятности на различных фоновых кадрах обозначаются  $P_i(C_2|C_1)$  или просто  $P_i$ , где  $i$  — номер рассматриваемого кадра.

Один из возможных способов построить единый опорный кадр по выборке — положить, что все значения этой выборки зависят от искомого значения как от параметра, и построить оценку этого параметра. Допустим,  $P_i = P_0 + \xi_i$ , где  $P_0$  — "истинное" значение вероятности (фактически значение упоминавшейся ранее плотности вероятности  $\rho_{C_1}(C_2)$ ), а  $\xi_i$  — случайная величина с нулевым математическим ожиданием ( $\forall i, M(\xi_i) = 0$ ), описывающая флуктуации  $P_i$  вследствие неодинакового цвета одних и тех же пикселей на разных кадрах. В математической статистике [5, стр. 73] несмещенной оценкой параметра называется случайная величина, математическое ожидание которой совпадает с оцениваемым параметром. Тогда несмещенной оценкой  $\bar{P}_n$  параметра  $P_0$  по  $n$

кадрам будет  $\bar{P}_n = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n P_{i_k}$ . Может показаться,

что усреднение по времени обработанного участка видео и даст искомый кадр. Однако в этом рассуждении имеются две перечисленные далее ошибки. Первая из них — предположение, что флуктуации значения  $P_i$  вокруг истинной вероятности имеют нулевое математическое ожидание. Оно может выполняться только в том случае, если все фоновые кадры сняты в близких к постоянным условиях. Если же в рассматриваемой выборке появятся кадры с различными условиями съемки, то они как минимум будут демонстрировать

два характерных поведения. Поэтому общая оценка флуктуации совершенно необязательно будет иметь нулевое математическое ожидание. Такую выборку кадров следует разбить на несколько, по числу постоянства условий съемки, и анализировать каждую из них по отдельности. Вторая ошибка связана со следующим обстоятельством. Если все-таки положить математическое ожидание флуктуации нулевым, то для получения более хорошего приближения  $P_0$  путем усреднения по времени вероятностей  $P_i$  для фоновых кадров с близкими условиями съемки нужно доказать состоятельность оценки  $\bar{P}_n$ . Этот факт означает ее сходимости к  $P_0$  по вероятности при увеличении  $N$  [5, стр. 75, 438]. В частном случае, когда рассматриваемые величины независимы, это не составило бы труда. Вместе с тем очевидным образом зависимое поведение объектов на близких по времени кадрах предполагает исследование характера поведения последовательности  $P_i$  в зависимости от того, насколько разнесены рассматриваемые кадры по времени. На основе результатов такого исследования можно сделать вывод о применимости или неприменимости данной гипотезы в каждом конкретном случае.

Устранение двух изложенных допущений представляет собой отдельную задачу, которая может быть положена в основу дальнейших исследований на данном направлении. Если при некоторых условиях можно считать их справедливыми, то вся процедура поиска фона сильно упростится. В противном же случае решение о принадлежности кадровых точек фону или объектам вновь должно приниматься с учетом специфики задачи или даже, быть может, конкретного случая ее применения.

### Характеристика полученных результатов

Далее приводятся результаты сравнения одновременной работы фоновно-разностного и изложенного выше (в дальнейшем — "нового") алгоритма на видеопотоке, содержащем резкую перемену освещенности. Рассмотрена ситуация, которая возникает непосредственно перед резким затенением области дороги и в процессе этого затенения.

В приведенной реализации в качестве опорных данных о фоне использовалась информация из динамически обновляемого набора кадров видеопотока с учетом их расстояния до текущего кадра по времени. В первом случае применялся описанный выше алгоритм с решающим правилом линейной сложности для различения фона и объектов. В случае фоновно-разностного метода по ин-

формации из видеопотока строился кадр, который затем вычитался из исследуемого кадра видео.

На рис. 1 показан кадр, в котором облако только начало появляться.

Изменение яркости еще не заметно, однако оно уже влияет на работу двух алгоритмов. Поскольку затененная часть экрана мала, новый алгоритм сначала считает фронт изменения яркости за объект, и это даже приводит к потере двух объектов, как видно на рис. 2. На самом деле, их можно частично восстановить пороговой обработкой ([4, стр. 180]), и искажение происходит лишь в том случае, если они находятся внутри фронта изменения яркости. Такой эффект наблюдается менее чем на 10 кадрах.

Вместе с тем, поскольку сила затенения совсем мала, в случае с фоновно-разностным алгоритмом, результат работы которого показан на рис. 3, си-



Рис. 1. Исходный кадр перед появлением облака



Рис. 2. Результат работы изложенного алгоритма



Рис. 3. Результат работы фоново-разностного алгоритма

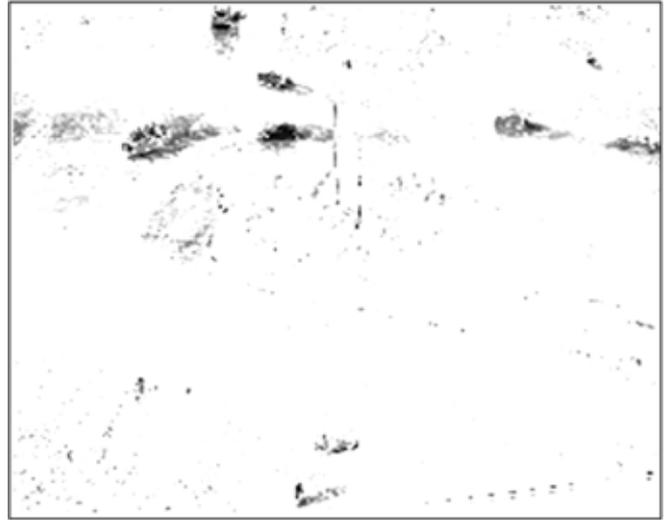


Рис. 5. Результат работы изложенного алгоритма



Рис. 4. Исходный кадр с облаком

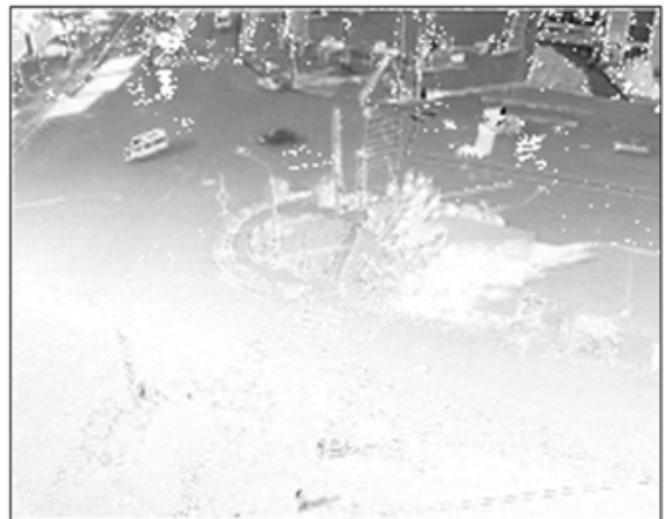


Рис. 6. Результат работы фоново-разностного алгоритма

туация чуть лучше. В этом случае объекты пока не потеряны, и пороговая обработка их отсечет от фона четче, чем в первом случае.

Уже сейчас можно сравнить глубину фронта изменения яркости. Для фоново-разностного алгоритма он занимает всю область измененной яркости. Для нового алгоритма этот фронт занимает узкую полосу на ее границе, что значит — ситуация уже прошла худший для распознавания период. Результат работы алгоритма улучшается с увеличением затененной области, поскольку пиксели, бывшие в тени дольше других, уже начинают приходить в норму. Таким образом, в то время как фоново-разностный алгоритм еще не в состоянии определить опасную ситуацию, в новом уже идет процесс ее ликвидации.

Далее на рис. 4 приводится ситуация через несколько секунд, когда тень от облака накрывает половину кадра.

Ситуация такова, что объекты имеются как в светлой (люди внизу кадра), так и в темной области. На рис. 5 показан результат работы нового алгоритма.

На этом рисунке вообще не заметно, что кадр разделен пополам, из-за большой относительной площади каждой части поведение фоновых пикселей в них считается типичным. В результате обнаружены объекты как в затененной, так и в освещенной областях. Это два пешехода в нижней части кадра.

Теперь нужно понаблюдать работу на этом кадре обычного фоново-разностного алгоритма. Поскольку скорость движения фронта смены яркости сравнима со скоростью передвижения автомобилей, система обновления фонового кадра в нем не могла среагировать на изменение окружения, а значит, как видно на рис. 6, данный ал-

горитм работать не будет. Предполагается, что результатом должна стать карта, где объектам соответствует темный цвет, а фону светлый. Здесь же некоторые объекты темнее, а некоторые светлее фона, и применить пороговую обработку не представляется возможным. Причина в том, что результатом ее работы будут фрагменты здания и тротуара в правом верхнем углу, которые, фактически являясь фоном, темнее самых темных объектов.

Следовательно, изложенный алгоритм при одинаковых исходных данных дает большую устойчивость к спонтанным и резким изменениям освещенности, чем типовой фоновой-разностный метод. Кроме эффективности в плане практического применения он представляет интерес в качестве объекта для исследования на предмет определения сферы такого применения, оценок производительности и трудозатрат на реализа-

цию. Для этих оценок математическая база алгоритма нуждается в развитии и более детальной структуризации, что может стать предметом дальнейших исследований.

#### Список литературы

1. **Tian Y., Hampapur A.** Robust Salient Motion Detection with Complex Background for Real-Time Video Surveillance // Proceedings of the IEEE Workshop on Motion and Video Computing. 2005. Vol. 2. P. 30–35.
2. **Gutchess D., Trajkovic M., Cohen-Solal E., Lyons D., Jain A. K.** A background model initialization algorithm for video surveillance // Eighth IEEE International Conference on Computer Vision. 2001.
3. **Ren Y., Chua C., Ho Y., Chen Y.** Motion Detection from Time-Varied Background // International Journal of Image and Graphics. 2002. Vol. 2. N 2. P. 163–178.
4. **Методы** компьютерной обработки изображений / Под ред. В. А. Сойфера. 2-е изд., испр. М.: ФИЗМАТЛИТ. 2003.
5. **Лагутин М. Б.** Наглядная математическая статистика: Учеб. пособие. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. 472 с.

## НЕЙРОСЕТИ

УДК 004.056.3:004.037.26

**С. В. Жернаков**, д-р. техн. наук,  
Уфимский государственный авиационный  
технический университет,  
e-mail: rhsviit@mail.ru

### Идентификация характеристик ГТД на основе технологии нейронных сетей

*Предлагается один из подходов к решению задач идентификации параметров авиационных двигателей на основе аппарата нейронных сетей. Предложена методика по разработке систем идентификации на основе нейронных сетей, которая может использоваться на этапах, стендовых и доводочных испытаний авиационных двигателей.*

**Ключевые слова:** отказоустойчивость, контроль, диагностика, нейронные сети

Развитие современной авиационной транспортной системы привело к повышению нагрузки на авиационный газотурбинный двигатель (ГТД) и на его основные узлы, что негативно сказалось на безопасности полетов. В условиях повышенной нагрузки на узлы и агрегаты ГТД повышение безопасности его функционирования достигается на основе использования стратегии управления эксплуатацией по фактическому техническому состоянию. Это предполагает использование наряду с классическими подходами и новых интел-

лектуальных методов, позволяющих эффективно и качественно осуществлять процесс контроля параметров авиационного двигателя, с учетом так называемых *НЕ-факторов*: неполноты измеряемой информации, шумов измерений, наличия конструктивной, параметрической и экспертной неопределенности при оценке параметров ГТД и т. д.

Основу управления эксплуатацией современного ГТД составляет подчинение целей функционирования его бортовых информационных технологий контроля и управления эксплуатацией целям функционирования авиационного двигателя, определяющим правила и порядок обработки комплексной информации в соответствии с условиями его эксплуатации. В настоящее время повышение эксплуатационной нагрузки на ГТД приводит к сокращению времени на его обслуживание, т. е. на контроль и диагностику технического состояния, что требует использования оперативных и эффективных методов контроля, базирующихся на комплексной автоматизации и интеллектуализации этих процессов. Эффективность контроля состояния авиационного двигателя существенно зависит от вероятности правильного распознавания его технического состояния, которая непосредственно влияет на качество систем управления эксплуатацией ГТД, что в конечном итоге определяет экономичность и безопасность полетов.

Несмотря на значительный объем исследований в данной области информационные техноло-

гии контроля параметров ГТД не являются совершенными по ряду причин: с одной стороны — слабая информационная "увязка", отсутствие элементов "интеллектуальности", позволяющих быстро, качественно и эффективно осуществлять поддержку принятия ответственных решений и, как следствие, сокращать общее время, затрачиваемое на обслуживание ГТД; с другой стороны — нестационарность физических процессов в авиационном двигателе, сложность их математического описания, зависимость его технических характеристик от внешних условий работы, ограниченный состав измеряемых параметров, их технологический разброс и т. д. Указанные факторы приводят к необходимости автоматизации процессов принятия решений о техническом состоянии двигателя в условиях неопределенности.

Основными направлениями, определяющими повышение эффективности бортовых информационных технологий контроля состояния ГТД, следует считать интеллектуализацию процессов обработки информации с привлечением нейросетевых методов, которые способны обеспечить повышение качества бортовых алгоритмов контроля параметров ГТД при действии указанных выше факторов неопределенности. Таким образом, создание бортовых информационных технологий контроля и диагностики технического состояния авиационного двигателя предполагает разработку соответствующих метода, методики, алгоритмического и программного обеспечения, позволяющих повысить эффективность и качество решения задач контроля и управления эксплуатацией авиационных ГТД.

### **Особенности бортовой реализации нейросетевых алгоритмов контроля и диагностики ГТД**

Анализ работ в области построения бортовых систем контроля и диагностики (БСКД) современных авиационных двигателей как в России, так и за рубежом свидетельствует о том, что при их разработке наметилась устойчивая тенденция к интеллектуализации и переход от пассивного контроля к активному, позволяющему не только локализовать отказы, но и по возможности устранить их [1—3]. Таким образом, БСКД постепенно выделяются в самостоятельные системы, обладающие высокой сложностью, многопроцессорностью, способные решать комплексные задачи с высоким качеством и эффективностью в темпе реального времени. Следует отметить и то обстоятельство, что современные БСКД взаимодействуют с системами управления ГТД, позволяя последним, плавно и своевременно воздействуя на исполнительные механизмы, с одной стороны, повышать качество управления авиационным

двигателем и его подсистемами, а с другой — повышать надежность ГТД в процессе его эксплуатации. Однако наличие факторов неопределенности (НЕ-факторов), а также необходимость принятия оперативных решений в реальном времени создают дополнительные проблемы в процессе контроля и диагностики в рамках БСКД.

Анализ современных БСКД показывает, что спектр задач, решаемых ими, непрерывно растет. Это объясняется постоянным совершенствованием самого авиационного двигателя и, как следствие, выполняемых им функций, а также соответствующим увеличением числа контролируемых и диагностируемых параметров на борту самолета. Так, БСКД для ТВВД [1, 3] решает широкий спектр задач, связанных с оценкой остаточного ресурса ГТД и контролем его параметров. В процессе решения задачи выработки ресурса ГТД решаются задачи прогноза (краткосрочного) текущего состояния двигателя и тренд-анализа его параметров. В БСКД ТВВД решаются задачи контроля большого числа параметров двигателя:

- температуры и давления газов за и перед турбиной;
- частоты вращения ротора компрессора низкого и высокого давления;
- работоспособности системы смазки и суфлирования ГТД по предельным значениям параметров маслосистемы двигателя;
- расхода масла по изменению уровня в маслобаке ГТД;
- работоспособности топливной системы ГТД;
- уровня вибраций;
- температуры в полостях двигателя;
- температуры подшипника;
- массового расхода топлива;
- температуры и давления воздуха за компрессором;
- технического состояния проточной части двигателя по его термогазодинамическим параметрам.

Вместе с тем, при большом многообразии решаемых задач существуют определенные сложности:

- ограниченные вычислительные ресурсы (объем оперативной памяти, быстродействие, точность полученных результатов);
- трудности формализации классических алгоритмов контроля и диагностики и, как следствие, их практической реализации;
- необходимость реализации перечисленных выше алгоритмов на языке низкого уровня (ассемблер);
- трудности восстановления информации при отказе датчиков.

В этих условиях использование нейросетевых технологий весьма перспективно. Ниже рассматриваются особенности применения нейросетевых

технологий в составе БСКД на примере решения последней из перечисленных выше задач, связанной с использованием имеющейся аналитической избыточности при измерении параметров ГТД для восстановления сигналов при отказах датчиков.

### Восстановление информации при отказе датчиков с использованием нейросетевой модели ГТД

Одной из ключевых задач, решаемых на борту летательного аппарата, является выявление параметрических отказов датчиков (деградации их характеристик). В этом случае, как правило, используется метод мажоритарного контроля (рис. 1) [4].

Суть метода мажоритарного контроля заключается в том, что если среди датчиков  $D_1$  или  $D_2$  (измеряющих, например, давление воздуха за компрессором  $P_2^*$ ) (рис. 1) (где \* означает заторможенный параметр по тракту авиационного двигателя) один из них имеет характеристику, отличную от эталонной, то введение дополнительного канала измерения в виде математической модели (ММ) позволяет вычислять среднее значение данного измерения (медиану) и тем самым восстанавливать потерянную с датчика информацию. В данной работе предлагается использовать в качестве ММ ГТД его нейросетевую модель, полученную в процессе решения задачи идентификации (рис. 2).

Решение задачи восстановления информации с использованием нейросетевой модели ГТД декомпозируется на две подзадачи:

- задача идентификации ММ;
- задача восстановления информации.

Рассмотрим подробно решение каждой из перечисленных выше задач.

### Идентификация характеристик ГТД на основе нейронных сетей

Вопросам идентификации характеристик ГТД с использованием нейронных сетей (НС) в последние годы уделяется значительное внимание [5–27]. Вместе с тем, полученные в этом направлении результаты не лишены определенных недостатков, заключающихся в следующем:

- процесс решения задачи идентификации в нейросетевом базисе, как правило, осуществляется на основе метода проб и ошибок;
- отсутствуют обоснованные рекомендации по выбору структуры (сложности) НС, алгоритмов обучения и т. д.;
- отсутствует формализованная инженерная методика решения подобных задач.

Как показывают исследования, основные этапы инженерной методики построения нейросетевой модели ГТД должны включать в себя:

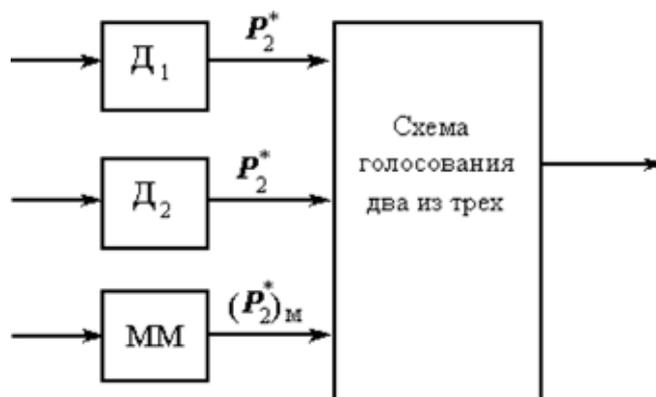


Рис. 1. Реализация мажоритарного контроля

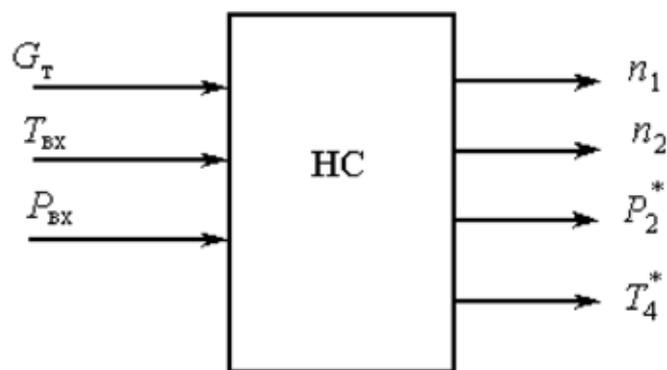


Рис. 2. Нейросетевая модель ГТД:

$G_T$  — расход топлива, подаваемого в камеру сгорания (кг/с);  $T_{вх}$  — температура на входе в двигатель (К);  $P_{вх}$  — давление на входе в двигатель (Па);  $n_1$  — частота вращения ротора компрессора низкого давления (%);  $n_2$  — частота вращения ротора компрессора высокого давления (%);  $P_2^*$  — давление воздуха за компрессором (КПа);  $T_4^*$  — температура газов за турбиной (К)

1. Предварительный анализ данных на этапе постановки задачи и выбора архитектуры НС.
2. Преобразование (предобработка) данных для построения более эффективной процедуры НС.
3. Выбор архитектуры НС.
4. Выбор структуры НС.
5. Выбор алгоритма обучения НС.
6. Обучение и тестирование НС.
7. Анализ точности полученного решения.

Рассмотрим постановку задачи идентификации характеристик ГТД на установившихся режимах работы. На этих режимах двигатель описывается уравнениями вида

$$\begin{aligned} X &= f_1(A, U); \\ Y &= f_2(A, X), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $X$ ,  $Y$ ,  $U$  и  $A$  — векторы переменных состояния, выходов (измеряемых термодинамических параметров) ГТД, неизвестных параметров и управляющих воздействий модели, размерности  $r$ ,

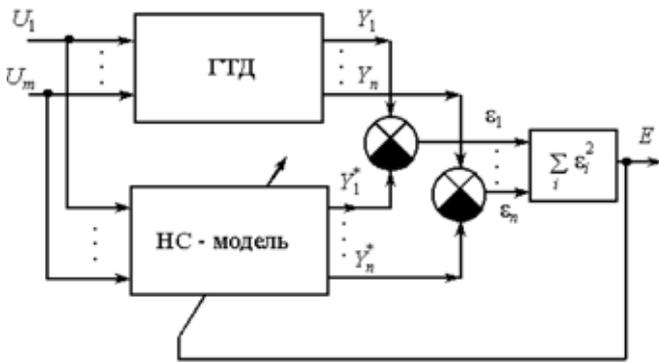


Рис. 3. Схема решения задачи идентификации ГТД

$n$ ,  $m$  и  $k$  соответственно;  $f_1$  и  $f_2$  — некоторые нелинейные вектор-функции.

Задача идентификации заключается в нахождении такой зависимости

$$Y^* = f^*(A, U), \quad (2)$$

которая бы удовлетворяла условию  $\|Y - Y^*\| < \varepsilon$  на заданном множестве значений  $X \in \Gamma_x$ ,  $Y \in \Gamma_y$ ,  $U \in \Gamma_u$ , где  $\Gamma_x$ ,  $\Gamma_y$ ,  $\Gamma_u$  определяются режимами работы ГТД;  $\varepsilon$  — допустимая погрешность. Процедура идентификации ГТД с помощью НС показана на рис. 3.

Здесь  $\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n$  — отклонения между измеренными параметрами двигателя  $Y_1, Y_2, \dots, Y_n$  и параметрами  $Y_1^*, Y_2^*, \dots, Y_n^*$ , рассчитанными с использованием НС при одних и тех же управляющих воздействиях  $U_1, \dots, U_m$ ;  $E$  — суммарная квадратичная ошибка обучения НС.

Решение задачи идентификации ГТД сводится к обучению НС, которое заключается в настройке ее весов исходя из условия (3):

$$E = \sum_{i=1}^n (Y_i - Y_i^*)^2 \rightarrow \min. \quad (3)$$

Рассмотрим различные постановки задачи идентификации ГТД:

- идентификация параметров статической многорежимной модели ГТД;
- идентификация параметров обратной (статической) многорежимной модели ГТД;
- идентификация динамической модели ГТД [5–27].

**Идентификация параметров статической многорежимной модели ГТД.** В теории авиационных двигателей принято описывать множество установившихся режимов работы ГТД совокупностью функциональных зависимостей относительно значений приведенных параметров двигателя:

$$\begin{aligned} n_{1пр} &= f_1(G_{Tпр}); \quad n_{2пр} = f_2(G_{Tпр}); \\ G_{Bпр} &= f_3(G_{Tпр}); \quad P_{2пр}^* = f_4(G_{Tпр}); \\ T_{2пр}^* &= f_8(G_{Tпр}); \quad T_{3пр}^* = f_5(G_{Tпр}); \\ T_{4пр}^* &= f_6(G_{Tпр}); \quad R_{пр} = f_7(G_{Tпр}), \end{aligned} \quad (4)$$

где  $n_{1пр}$  — приведенная частота вращения ротора компрессора низкого давления (%);  $n_{2пр}$  — приведенная частота вращения ротора компрессора высокого давления (%);  $G_{Bпр}$  — приведенный расход воздуха через компрессор (кг/с);  $P_{2пр}^*$  — приведенное давление воздуха за компрессором (КПа);  $T_{2пр}^*$  — приведенная температура воздуха за компрессором (К);  $T_{3пр}^*$  — приведенная температура газов перед турбиной (К);  $T_{4пр}^*$  — приведенная температура газов за турбиной (К);  $R_{пр}$  — приведенная тяга (кН);  $G_{Tпр}$  — приведенный расход топлива (кг/с).

Процесс перехода от физических параметров двигателя к приведенным значениям (и обратно), осуществляемый с помощью нейросетевой модели ГТД, показан на рис. 4.

Здесь преобразование измеренных (физических) параметров ГТД к приведенным (соответствующим стандартным атмосферным условиям  $T_H^* = 288,15$  К;  $P_H^* = 760$  мм рт. ст.) осуществляется по формулам газодинамического подобия:

$$\begin{aligned} n_{1пр} &= n_1 \sqrt{\frac{288}{T_H^*}}; \quad n_{2пр} = n_2 \sqrt{\frac{288}{T_H^*}}; \\ G_{Bпр} &= \frac{G_B \cdot 760}{P_H^*} \sqrt{\frac{T_H^*}{288}}; \quad P_{2пр}^* = P_2 \frac{760}{P_H^*}; \\ T_{2пр}^* &= T_2^* \frac{288}{T_H^*}; \quad T_{3пр}^* = T_3^* \frac{288}{T_H^*}; \quad T_{4пр}^* = T_4^* \frac{288}{T_H^*}; \\ R_{пр} &= R \frac{760}{P_H^*}, \end{aligned} \quad (5)$$

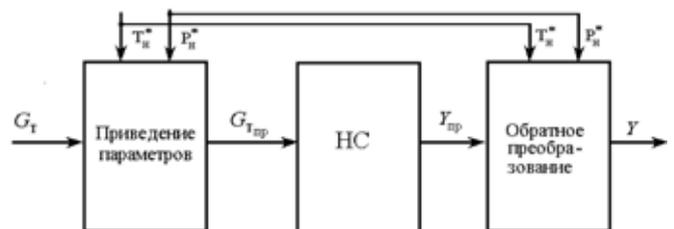


Рис. 4. Переход от нейросетевой модели ГТД в приведенных параметрах к модели в физических параметрах

Таблица 1

Фрагмент обучающей выборки (данные испытаний ГТД)

$G_{T_{пр}}$	$n_{1_{пр}}$	$n_{2_{пр}}$	$G_{B_{пр}}$	$P_{2_{пр}}^*$	$T_{4_{пр}}^*$	$R_{пр}$	$T_{2_{пр}}^*$	$T_{3_{пр}}^*$
0,193	0,538	0,736	0,418	0,328	0,518	0,153	0,445	0,573
0,131	0,348	0,549	0,252	0,205	0,476	0,056	0,254	0,612
0,203	0,548	0,742	0,427	0,336	0,524	0,161	0,451	0,578
0,480	0,798	0,879	0,757	0,643	0,758	0,500	0,809	0,763
0,150	0,408	0,617	0,304	0,243	0,468	0,085	0,299	0,575
0,353	0,712	0,837	0,619	0,505	0,671	0,336	0,668	0,694
0,245	0,587	0,767	0,469	0,371	0,551	0,195	0,480	0,602
0,733	0,904	0,940	0,928	0,851	0,859	0,774	0,930	0,856
1,015	1,015	1,006	1,036	1,043	1,019	1,056	1,055	1,014
0,141	0,379	0,585	0,279	0,225	0,470	0,070	0,275	0,591
0,153	0,415	0,626	0,311	0,248	0,469	0,089	0,305	0,572
0,562	0,837	0,900	0,825	0,719	0,793	0,595	0,861	0,792
0,375	0,731	0,846	0,647	0,532	0,692	0,366	0,700	0,710
0,133	0,356	0,559	0,259	0,210	0,474	0,059	0,259	0,606
0,173	0,465	0,674	0,355	0,281	0,479	0,144	0,350	0,563
0,134	0,358	0,561	0,260	0,211	0,474	0,060	0,261	0,605
0,146	0,396	0,605	0,294	0,236	0,468	0,079	0,289	0,580
0,161	0,439	0,649	0,331	0,263	0,472	0,100	0,326	0,566

где  $T_H$  и  $P_H$  — соответственно температура (К) и давление (мм рт. ст.) воздуха на высоте полета  $H$ ;  $T_H^*$  и  $P_H^*$  — заторможенные значения этих параметров на данной высоте полета.

Влияние условий полета на параметры воздуха на входе в двигатель при этом учитывается в виде

$$T_H^* = T_H \left( 1 + \frac{k-1}{2} M_{\Pi}^2 \right);$$

$$P_H^* = P_H \left( 1 + \frac{k-1}{2} M_{\Pi}^2 \right)^{\frac{k}{k-1}} \sigma_B, \quad (6)$$

где  $k$  — показатель адиабаты;  $M_{\Pi}$  — число Маха полета;  $\sigma_B$  — коэффициент восстановления полного давления в воздухозаборнике.

Рассмотрим пример решения задачи идентификации характеристик ГТД, полученных в процессе стендовых испытаний двигателя.

1. *Анализ данных.* В качестве исходных данных воспользуемся результатами испытаний, полученными в процессе натурных испытаний двухвального двигателя на моторном стенде. Эти данные записаны применительно к стандартным атмосферным условиям в табл. 1.

Полная обучающая выборка содержит 109 строк, соответствующих различным режимам испытаний. Здесь в относительных (безразмерных) единицах приведены следующие параметры:  $G_{T_{пр}}$  — приведенный расход топлива;  $n_{1_{пр}}$  — приведенная частота вращения ротора компрессора низкого давления;  $n_{2_{пр}}$  — приведенная частота вращения ротора компрессора высокого давле-

ния;  $G_{B_{пр}}$  — приведенный расход воздуха;  $P_{2_{пр}}^*$  — приведенное давление воздуха за компрессором;  $T_{4_{пр}}^*$  — приведенная температура газов на выходе из турбины;  $R_{пр}$  — приведенная тяга двигателя;  $T_{2_{пр}}^*$  — приведенная температура воздуха на выходе из компрессора;  $T_{3_{пр}}^*$  — приведенная температура газов перед турбиной.

Одним из основных вопросов, решаемых на этапе анализа данных, является оценка репрезентативности выборки, т. е. полноты ее представления. Решение данной задачи осуществляется с помощью методов кластерного или дискриминантного анализа [28].

В процессе кластеризации с помощью пакета Statistica 6.0 были выделены восемь классов (рис. 5). После процедуры рандомизации были выделены собственно обучающая (контрольная) и тестовая выборки (в соотношении 2 : 1, т. е. 67 % и 33 %). Процесс кластеризации обучающей (рис. 6) и тестовой выборок показывает, что они так же, как и исходная выборка, содержат по восемь классов. Расстояния между кластерами практически совпадают в каждой из рассмотренных выборок, следовательно, обучающая и тестовая выборки репрезентативны.

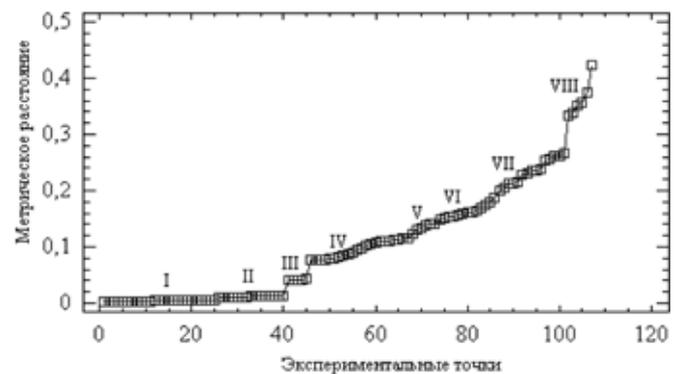


Рис. 5. Результаты кластеризации исходной экспериментальной выборки (I...VIII — классы)

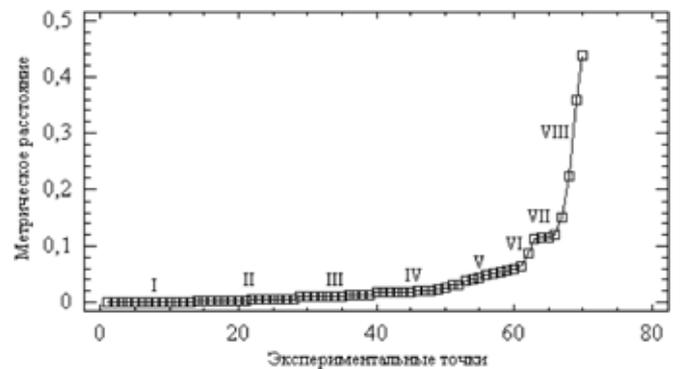


Рис. 6. Результаты кластеризации обучающей выборки

Таблица 2

## Анализ однородности обучающей и тестовой выборки

Статистические оценки	$n_{1пр}$ (обучающая выборка)	$n_{1пр}$ (тестовая выборка)
Среднее	0,6214	0,6731
Дисперсия	0,04819	0,06168
Отношение большей дисперсии к меньшей	1,28	
$F$ — критическая точка	3,44	

2. *Предобработка данных.* Важным вопросом, решаемым на этапе предварительной обработки измеренных данных, является оценка однородности обучающей и тестовой выборки. Для этого воспользуемся критерием Фишера—Снедекора [28]. Полученные при этом результаты для различных значений частоты вращения  $n_{1пр}$  приведены в табл. 2. Анализ этих результатов показывает, что отношение большей и меньшей дисперсий  $\sigma_{\max}^2 / \sigma_{\min}^2$  равно 1,28, что меньше критического значения  $F$ , взятого из стандартной таблицы Фишера—Снедекора (в нашем случае  $F = 3,44$ ). Следовательно, выборки однородны.

Завершающим этапом статистической обработки данных является их нормирование, которое может быть выполнено по формуле

$$\tilde{y}_i = \frac{y_i - y_{i_{\min}}}{y_{i_{\max}} - y_{i_{\min}}}, \quad (7)$$

где  $\tilde{y}_i$  — безразмерная величина, находящаяся в диапазоне  $[0; 1]$ ;  $y_{i_{\min}}$  и  $y_{i_{\max}}$  — минимальное и максимальное значения переменной  $y_i$ .

3. *Выбор архитектуры НС.* Для решения задачи идентификации ГТД в нейросетевом базисе в качестве основных архитектур были выбраны перцептрон и сеть на радиально-базисных функциях (НС РБФ). Целесообразность применения этих архитектур НС обоснована многочисленными экспериментальными исследованиями, проведенными в процессе решения задачи идентификации модели ГТД.

4. *Выбор структуры НС.* На данном этапе решения задачи идентификации должна быть выбрана оптимальная структура нейронной сети, т. е. число вхо-

дов и выходов НС, скрытых слоев и числа нейронов в каждом слое. На рис. 7 показан общий вид многослойной НС прямого распространения (перцептрон) с одним скрытым слоем, реализующей статическую многорежимную модель ГТД. На рис. 8 приведена экспериментальная зависимость  $E = f(N)$ , где  $E$  — суммарная квадратичная ошибка обучения НС;  $N$  — число нейронов в скрытом слое (в данном случае число нейронов во входном слое равно 1, в выходном слое — 8). На этом же рисунке приведена аналогичная зависимость, полученная для НС типа РБФ.

На графиках: EPS1 — ошибка обучения НС на базе перцептрона; EPS2 — ошибка обучения НС РБФ. В качестве активационных функций нейронов для перцептрона использовались сигмоидные функции. Оптимальными структурами НС являются: для перцептрона — структура 1—6—8 (т. е. 1 нейрон — во входном слое; 6 нейронов — в скрытом слое и 8 нейронов — в выходном слое НС); для НС РБФ — 1—16—8, (т. е. 1 нейрон во входном слое; 16 нейронов — в радиальном (скрытом) слое и 8 нейронов — в выходном слое). Эти НС-модели позволяют вычислить восемь перечисленных выше параметров ГТД в функции от приведенного расхода топлива  $G_{т.пр}$ .

Отметим, что НС РБФ представляет собой двухслойную сеть (рис. 9), в которой первый слой

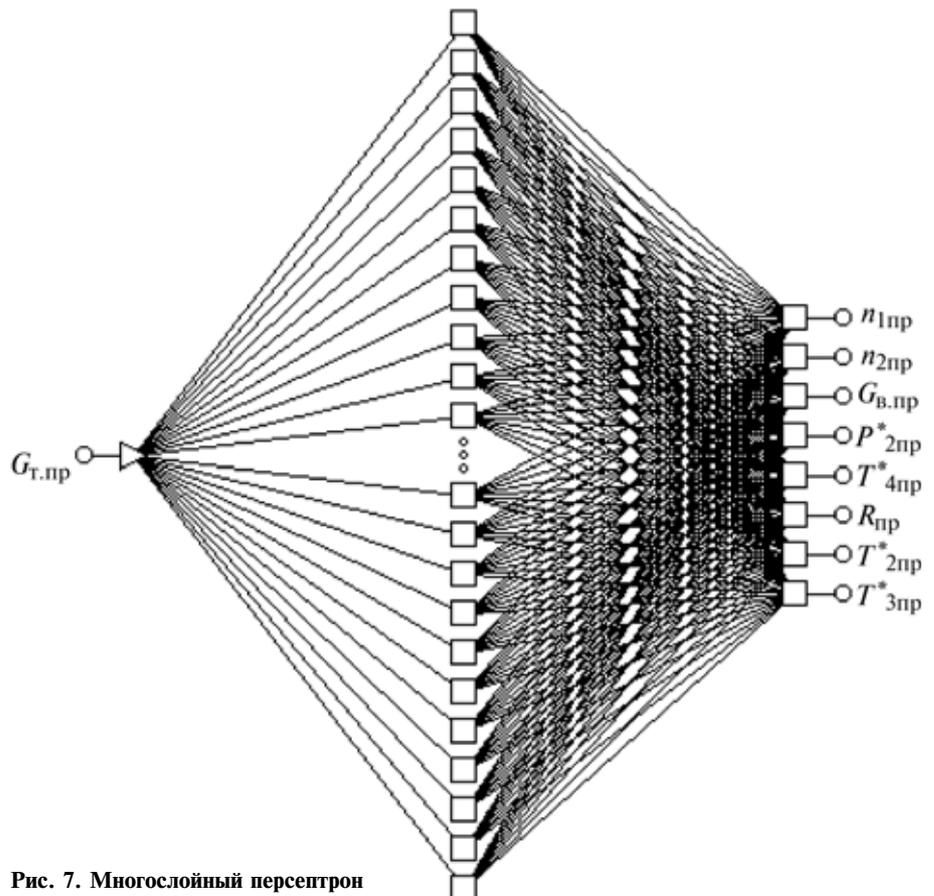


Рис. 7. Многослойный перцептрон

осуществляет нелинейное преобразование входного сигнала  $G_{т.пр}$  без использования настраиваемых весов, а выходной слой объединяет полученные выходы 1-го слоя путем вычисления их линейной взвешенной комбинации.

Выходы НС РБФ описываются уравнениями

$$Y_i = W_{oi} + \sum_{j=1}^n W_{ij} f_j(G_{т.пр}),$$

$$i = 1, 2, \dots, n, \quad (8)$$

где  $G_{т.пр}$  — входной сигнал (приведенный расход топлива);  $W_{ij}$  — веса связей ( $i = 1, 2, \dots, 8$ ;  $j = 1, 2, \dots, 16$ );  $W_{oi}$  — величина смещения по  $i$ -му выходу НС;  $f_j(U)$  — активационные функции НС, определяемые в классе гауссовых функций:

$$f_j(G_{т.пр}) = \exp\left[-\frac{(G_{т.пр} - C_j)^2}{2\sigma_j^2}\right],$$

$$j = 1, 2, \dots, 16, \quad (9)$$

$C_j$  — величина, определяющая положение центра (эталона)  $j$ -го класса;  $\sigma$  — ширина гауссовой функции  $f_j(G_{т.пр})$ .

Настраиваемыми параметрами НС РБФ являются веса  $W_{ij}$ ,  $W_{oi}$  ( $i = 1, 2, \dots, 8$ ;  $j = 1, 2, \dots, 16$ ). Так как они линейно связаны с выходами НС и, следовательно, с ошибкой обучения, то их значения могут быть найдены, например, с помощью метода наименьших квадратов. При этом минимизируется суммарная квадратичная ошибка НС:

$$E = \frac{1}{2} \sum_{r=1}^R \sum_{i=1}^n (Y_i^{(r)} - Y_{io}^{(r)})^2, \quad (10)$$

где  $Y_i^{(r)}$  —  $i$ -й выход НС в  $r$ -м эксперименте, т. е. при предъявлении сети  $r$ -го входного образа  $U^{(r)}$ ;  $Y_{io}^{(r)}$  —  $i$ -й желаемый выход НС для входа  $U^{(r)}$ ;  $R$  — число различных экспериментов (размерность обучающей выборки);  $n = 8$ .

В отличие от ситуации, когда использование градиентных методов настройки параметров персептрона часто приводит лишь к достижению ло-

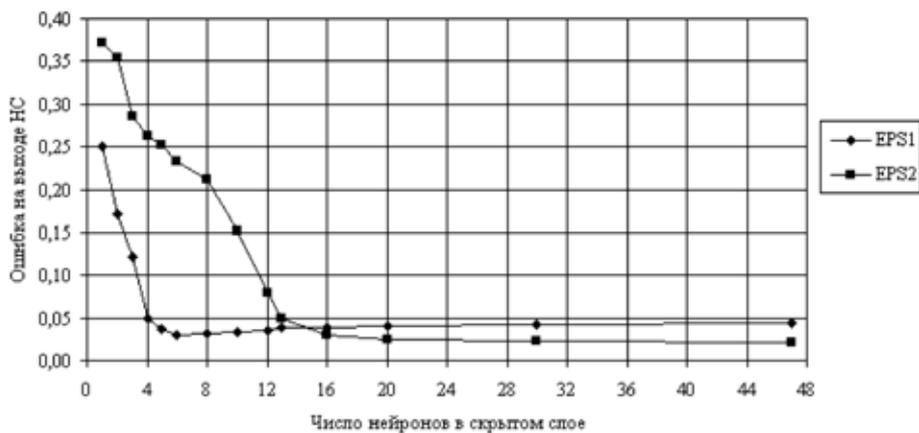


Рис. 8. Изменение ошибки на выходе НС в зависимости от числа нейронов в скрытом слое

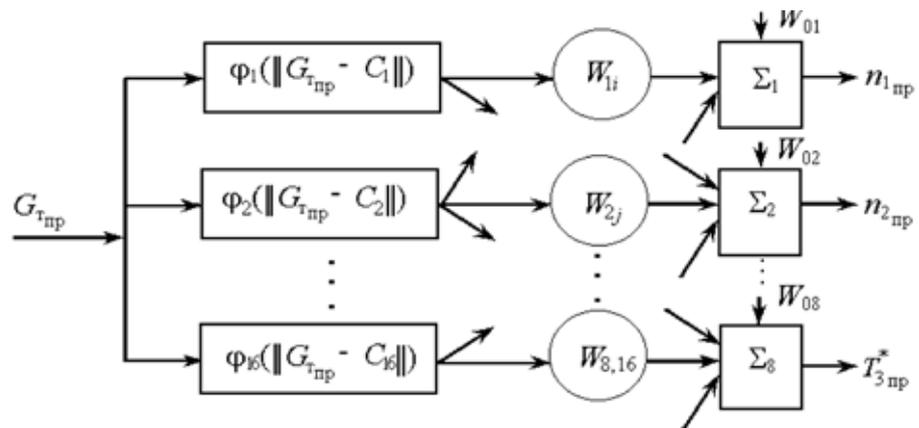


Рис. 9. Структура радиальной базисной НС

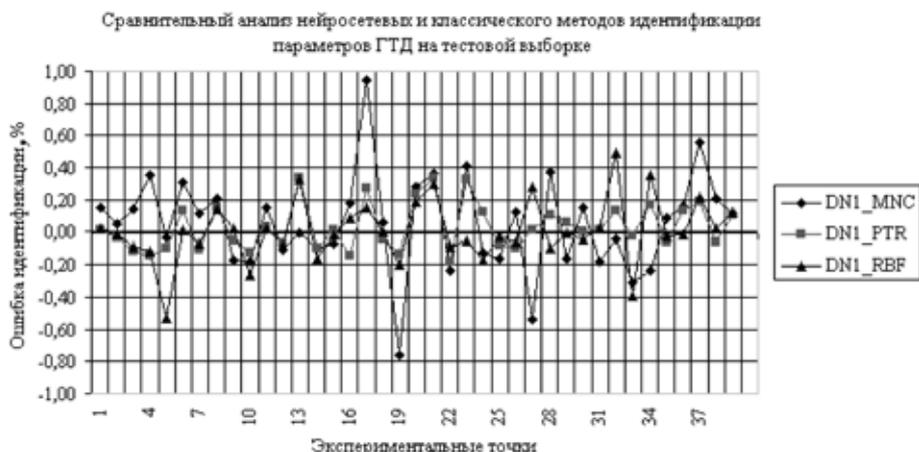


Рис. 10. Анализ погрешности модели ГТД для различных методов идентификации

кальных минимумов, здесь нахождение весов связей осуществляется быстрее и точнее [5].

5. Выбор алгоритмов обучения. В качестве алгоритмов обучения НС использовались:

- алгоритм обратного распространения ошибки (*Back Propagation*);
- квазиньютоновский алгоритм (*Quasi Newton*);
- алгоритм сопряженных градиентов (*Conjugate Gradients*) и их комбинации.

Таблица 3

**Сравнительный анализ погрешности идентификации классического и нейросетевых методов для параметров авиационного двигателя**

Метод идентификации	Относительная погрешность (%)							
	$n_{1пр}$	$n_{2пр}$	$G_{в.пр}$	$P_{2пр}^*$	$T_{4пр}^*$	$R_{пр}$	$T_{2пр}^*$	$T_{3пр}^*$
МНК	0,99	0,99	0,89	0,82	0,89	0,89	0,89	0,89
Персептрон	0,38	0,62	0,63	0,58	0,62	0,55	0,63	0,63
РБФ	0,59	0,74	0,74	0,68	0,74	0,74	0,74	0,74

Таблица 4

**Сравнительный анализ погрешности идентификации классического и нейросетевых методов для параметров авиационного двигателя в условиях аддитивной помехи ( $M = 0$ ;  $\sigma = \pm 0,025$ )**

Метод идентификации	Относительная погрешность (%)							
	$n_{1пр}$	$n_{2пр}$	$G_{в.пр}$	$P_{2пр}^*$	$T_{4пр}^*$	$R_{пр}$	$T_{2пр}^*$	$T_{3пр}^*$
МНК	2,47	2,14	1,75	1,95	2,49	1,93	2,13	2,14
Персептрон	0,65	0,68	0,72	0,78	0,83	0,84	0,73	0,73
РБФ	0,78	0,85	0,85	0,84	0,85	0,84	0,84	0,86

Анализ полученных результатов показал, что наиболее приемлемым является использование квази-ньютоновского алгоритма, который обеспечивает высокую скорость сходимости и точность процесса обучения.

6. *Оценка эффективности результатов идентификации.* В результате сравнительного анализа точности нейросетевых (персептрон, РБФ) и классического (метод наименьших квадратов МНК) методов идентификации ГТД по одному параметру — частоте вращения ротора компрессора низкого давления (рис. 10) — было установлено, что погрешность идентификации при использовании НС персептрон (DN1\_PTR) в 2,6 раза меньше, чем для полиномиальной регрессионной модели 8-го порядка, построенной с помощью МНК (DN1\_MNC), а для РБФ (DN1\_RBF) — меньше в 1,5 раза. При этом персептрон обеспечивает погрешность идентификации, не превышающую 0,38 %; НС РБФ — 0,59 %; МНК — 0,99 %.

Результаты анализа точности идентификации с использованием нейросетевых и классического методов для различных параметров ГТД приведены в табл. 3.

Анализ табл. 3 показывает, что значение погрешности идентификации ГТД не превышает: при использовании персептрона — 0,63 %; РБФ — 0,74 %; МНК — 0,99 %.

Для анализа устойчивости нейронных сетей к изменению входных данных (см. табл. 1) к ним добавлялась аддитивная помеха по отношению к текущему значению каждого из параметров в виде белого шума с нулевым математическим ожиданием и  $\sigma_i = 0,025$ . Результаты анализа точности идентификации для отдельных параметров ГТД в условиях действия шума представлена в табл. 4.

Графики значений погрешности частоты вращения ротора компрессора высокого давления ( $n_{2пр}$ ) и температуры газов за турбиной ( $T_{4пр}^*$ ) показаны соответственно на рис. 11 и 12.

### Заключение

На основании сравнительного анализа результатов идентификации ГТД с использованием нейросетевых и классического методов можно сделать следующие выводы.

- Нейронные сети решают задачу идентификации точнее классических методов: погреш-

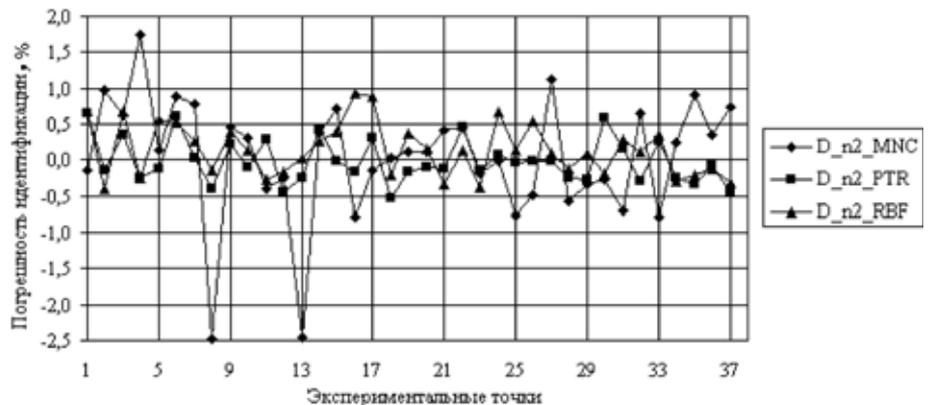


Рис. 11. Погрешность частоты вращения ротора компрессора высокого давления модели ГТД для нейросетевых и классического методов в условиях действия шума

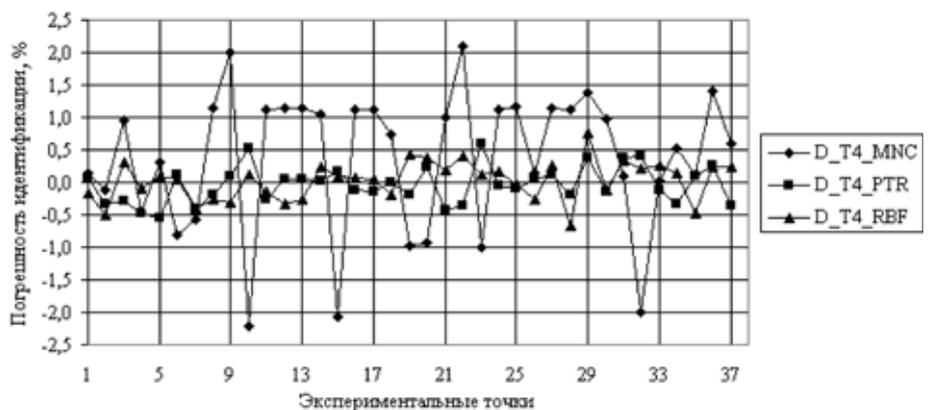


Рис. 12. Погрешность температуры газов за турбиной модели ГТД для нейросетевых и классического методов в условиях действия шума

- ность идентификации на выходе НС типа персептрон в 1,6 раза меньше, чем у регрессионной модели, полученной с помощью МНК для рассмотренного диапазона изменения режимов работы двигателя, начиная от малого газа до форсажа.
- Погрешность идентификации статической многорежимной модели ГТД с помощью персептрона не превысила 0,63 %; для НС РБФ — 0,74 %, в то время как для классического метода (МНК) она составляет около 1 % в рассмотренном диапазоне изменения режимов работы ГТД.
  - Нейросетевые методы более робастны к внешним возмущениям: для уровня шума  $\sigma = 0,025$  погрешность идентификации ГТД при использовании персептрона возросла с 0,63 до 0,84 %; для НС РБФ — с 0,74 до 0,86 %, а для метода наименьших квадратов — с 0,99 до 2,49 %.

*Результаты научных исследований поддержаны грантами РФФИ № 06-08-00446-а, 08-08-00774-а.*

#### Список литературы

1. **Васильев С. Н.** и др. Интеллектуальное управление динамическими системами. М.: Физматлит, 2000. 352 с.
2. **Котенко П. С.** Системы технического обслуживания и автоматизированного контроля летательных аппаратов: Учеб. пособие. Уфа: УГАТУ, 2000. 212 с.
3. **Федунов Б. Е.** Проблемы разработки бортовых оперативно-советующих экспертных систем для антропоцентрических объектов // Изв. РАН. Теория и системы управления. 1996. № 5. С. 147—159.
4. **Васильев В. И.** и др. Автоматический контроль и диагностика систем управления силовыми установками летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1989. 240 с.
5. **Головко В. А.** Нейронные сети: Обучение, организация и применение. М.: Радиотехника, 2001. 256 с.
6. **Дубровин В. И.** Интеллектуальные средства диагностики и прогнозирования надежности авиадвигателей. Запорожье: Мотор-Сич, 2003. 279 с.
7. **Леонов А. А.** Синтез нейронной сети для решения задачи идентификации состояния объекта // Нейроинформатика. М.: МИФИ, 2000. Т. 1. С. 100—109.
8. **Жернаков С. В.** Параметрическая идентификация ГТД гибридным ансамблем нейросетей // Нейрокомпьютеры: разработка и применение. 2001. № 4—5. С. 31—35.
9. **Жернаков С. В.** Распознавание параметров авиационного двигателя нейросетями // Автоматизация и современные технологии. 2003. № 4. С. 29—31.
10. **Жернаков С. В.** Идентификация параметров авиационного двигателя на основе нейронных сетей // Информационные технологии. 2003. № 12. С. 31—39.
11. **Жернаков С. В.** Идентификация характеристик ГТД на основе технологии нейронных сетей // Полет. 2006. № 10. С. 9—15.
12. **Жернаков С. В.** Идентификация характеристик газотурбинного двигателя на основе нейронных сетей // Приборы и системы. Управление. Контроль. Диагностика. 2006. № 11. С. 49—55.
13. **Идентификация систем** / Под ред. Я. З. Цыпкина. М.: Наука, 1995. 385 с.
14. **Куликов Г. Г.** Марковские модели сложных динамических систем: идентификация, моделирование и контроль состояния. Уфа: УГАТУ, 1998. — 104 с.
15. **Нечаев Ю. И.** Синтез самоорганизующейся нейронной сети в задаче идентификации состояний сложного динамического объекта // Нейроинформатика: Сб. статей конференции. — М.: МИФИ, 2001. Т. 2. С. 169—177.
16. **Осовский С.** Нейронные сети для обработки информации. М.: Финансы и статистика, 2002. 344 с.
17. **Яковенко А. В.** Идентификация математической модели движения самолета на основе нейросетевого подхода // Нейроинформатика: Сб. статей конференции. М.: МИФИ. 2002. Т. 2. С. 158—164.
18. **Arkov V. Y., Patel V. C. Kulikov G. G., Breikin T. V.** Aircraft Engine Condition Monitorings: Stochastic Identification and Neural Networks // Artificial Neural Networks, IEEE Conference Publication. 1994. N 440. P. 295—299.
19. **Dunia R., Mc Avoy T.** A Subspace Approach to Multidimensional Fault Identification and Reconstruction // AIChE. Journal. 1998. Vol. 44. P. 927—943.
20. **Dunia R., Qin S. J., Edgar T. F.** Sensor fault identification and reconstruction using principal component analysis // Proc. of 13th IF AC Triennial World Congress. 1998. Vol. 1. P. 259—264.
21. **Garsia A., Frank P. M.** On the relationship between observer and parameter identification based approaches to fault detection // The 3th IF AC World Congress. 1996. P. 25—29.
22. **Goel S., Hajela P.** Identification of Parameter Coupling in Turbine Design Using Neural Network // Journal of Propulsion and Power. 1996. Vol. 13. N 3. P. 503—508.
23. **Habib S., Zaghoul E.** System Identification Using Time Dependent Neural Networks // Proc. of the AIAA Guidance Navigation and Control Conference. 1996. P. 1—8.
24. **Napolitano M., Neppach C., Casdorff V.** Sensor Failure Detection, Identification and Accommodation Using On-Line Neural Architectures, AIAA 94—3598, AIAA Guidance Navigation and Control Conference, 1994. P. 345—358.
25. **Narendra K. S., Parasarathy K.** Identification and control of dynamical systems using neural networks // IEEE Trans. Neural Networks. 1990. Vol. 1, N 1. P. 4—27.
26. **Nells P., Ernst S., Isermann R.** Neuronale Netze zur Identifikation Nichtlinearer Dynamischer Systeme. Springer, 1997. 125 p.
27. **Ren X., Chen J.** A Modified Neural Network for Dynamical System Identification and Control // Proc. 14th World Congress of IFAC. 1999. Vol. 9. N 5. P. 376—388.
28. **Айвазян С. А.** Прикладная статистика. Классификация и снижение размерности. М.: Финансы и статистика, 1989. 393 с.

УДК 519.6

**С. М. Гоменюк**, студент,  
МГТУ им. Н. Э. Баумана,  
e-mail: S.gomenyuk@gmail.com,

**А. О. Емельянов**, канд. мед. наук, ст. науч. сотр,  
ФГУ "Эндокринологический научный центр",  
e-mail: endiab@mail.ru,

**А. П. Карпенко**, д-р физ.-мат. наук, проф.,  
МГТУ им. Н. Э. Баумана,  
e-mail: karpenko@nog.ru,

**С. А. Чернецов**, аспирант,  
МГТУ им. Н. Э. Баумана,  
e-mail: serge.a.ch@gmail.com

## Обзор методов и систем прогнозирования оптимальных доз инсулина для больных сахарным диабетом I типа

*Приводится обзор англоязычных публикаций, посвященных методам и системам прогнозирования оптимальных доз инсулина для больных сахарным диабетом I типа. Рассматриваются математические модели динамики инсулина и глюкозы в теле человека, а также нейросетевые и комбинированные алгоритмы и системы прогнозирования оптимальных доз инсулина.*

**Ключевые слова:** сахарный диабет I типа, математические модели динамики инсулина и глюкозы, нейросетевые системы прогнозирования оптимальных доз инсулина

### Введение

Сахарный диабет I типа — это метаболическое заболевание, вызванное абсолютным дефицитом секреции инсулина и характеризующееся неспособностью организма поддерживать уровень глюкозы в крови (BG — Blood Glucose) в целевом интервале 4...6 ммоль/л — в обычном состоянии и до 9 ммоль/л — после еды. Диабет представляет собой аутоиммунное заболевание, при котором разрушаются  $\beta$ -клетки поджелудочной железы, отвечающие за секрецию инсулина. Диабет вызывает множество опасных осложнений, избежать которые можно только путем контроля уровня BG и его удержания в физиологичном интервале [1].

В настоящее время разработаны препараты (генно-инженерные человеческие инсулины), которые могут симулировать действие эндогенного инсулина, вырабатываемого  $\beta$ -клетками здоровой

поджелудочной железы. По своим временным характеристикам (времени пика активности, а также временам начала и окончания действия с момента введения) искусственные инсулины делят на следующие типы:

- аналоги инсулина ультракороткого действия (*rapid-acting*) — начало действия через 5—15 мин после введения, окончание действия — через 3—4 ч;
- инсулины короткого действия (*short-acting*) — начало действия через 30 мин после введения, окончание действия — через 5—8 ч;
- инсулины продленного действия (*long-acting*) — начало действия через 1—3 ч после введения, окончание действия — через 16—24 ч.

Заметим, что продолжительность действия инсулина, который вырабатывается  $\beta$ -клетками поджелудочной железы здорового человека, равна примерно 30 мин. В отличие от эндогенного инсулина, который сразу попадает в кровь, искусственные инсулины вводятся в подкожно-жировую клетчатку пациента. Этим обстоятельством в значительной мере объясняется столь существенное различие в продолжительности действия естественного и искусственных инсулинов.

На значения уровня BG влияет множество факторов, которые можно разделить на следующие четыре группы.

1. *Предсказуемые факторы.* Влияние предсказуемых факторов на значения уровня BG можно прогнозировать с достаточно высокой точностью, хотя имеют место небольшие индивидуальные вариации чувствительности пациента к этим факторам. Действие предсказуемых факторов почти не зависит от остальных факторов. Основные предсказуемые факторы следующие:

- базовая потребность в инсулине — необходимое количество инсулина, которое при отсутствии факторов, повышающих или понижающих уровень глюкозы в крови, обеспечивает ее постоянный уровень; базовая потребность в инсулине определяется экспериментально методом проб и ошибок;
- введение дозы инсулина (понижает уровень BG);
- прием пищи (точнее — прием углеводсодержащей пищи). Прием пищи повышает уровень BG и приводит к дополнительной потребности в инсулине. Эта потребность обычно полагается пропорциональной количеству хлебных единиц ХЕ в пище (ХЕ = 12 г углеводов).

2. *Слабопредсказуемые факторы.* Влияние слабопредсказуемых факторов на уровень ВГ существенно зависит от значений других факторов. Наиболее существенным слабопредсказуемым фактором является физическая нагрузка. Влияние этого фактора на уровень ВГ зависит от уровня ВГ: при низких и нормальных значениях уровня ВГ физическая нагрузка снижает уровень ВГ, а при высоких — повышает.

3. *Факторы, влияние которых на уровень ВГ невозможно оценить.* К таким факторам относятся, прежде всего, эмоции и погода (жаркая погода может как повышать, так и понижать уровень ВГ).

4. *Случайные факторы.* Влияние на уровень ВГ каждого из случайных факторов невелико, но некоторые их комбинации могут существенно исказить влияние на уровень ВГ предсказуемых факторов.

Оптимальные типы и дозы искусственного инсулина (далее — инсулина) зависят от многих факторов. Подбор этих типов и доз является сложной задачей, с которой могут справиться далеко не все пациенты. Для решения указанной задачи созданы системы непрерывного измерения уровня ВГ — *Continuous glucose monitoring systems* (CGM-системы), а также системы непрерывного подкожного введения инсулина (инсулиновые помпы — *insulin pumps*). При этом различают "базальный" (*basal*) график (профиль) введения инсулина, который обеспечивает фоновое значение уровня ВГ, и "болюсный" (*bolus*) профиль, обеспечивающий дополнительное введение инсулина как реакцию на прием пищи или на гипергликемию (превышение уровнем ВГ верхней границы целевого интервала). При реализации базального профиля введение инсулина проводится импульсами минимально возможного объема (определяется конструкцией помпы), частота которых определяется требуемой скоростью введения. При реализации болюсного профиля введение инсулина также осуществляется в импульсном режиме.

На основе CGM-систем и инсулиновых помп разработаны и интенсивно разрабатываются системы автоматического управления (САУ) уровнем глюкозы в крови пациента. Центральной проблемой при разработке таких систем является проблема синтеза алгоритмов, обеспечивающих автоматическое определение требуемых доз инсулина. Указанные алгоритмы могут быть построены на основе классической теории автоматического управления, теории нечетких множеств, нейронных сетей, а также на основе комбинаций указанных подходов.

В работе дается обзор математических моделей динамики инсулина и глюкозы в теле пациента, используемых в САУ уровнем глюкозы в крови пациента. Приводится также обзор нейросетевых алгоритмов прогнозирования доз инсулина. Рассмотрены наиболее известные САУ уровнем глюкозы в крови пациента.

## 1. Математические модели динамики инсулина и глюкозы в теле пациента

### 1.1. Модели на основе обыкновенных дифференциальных уравнений

#### 1.1.1. Модель Бергмана (M. N. Bergman) [2].

Среди математических моделей динамики инсулина и глюкозы в теле пациента, построенных на основе обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ), наиболее известна минимальная модель Бергмана. Модель представляет собой систему ОДУ 3-го порядка

$$\begin{cases} \frac{dg(t)}{dt} = -(b_1 + x(t))g(t) + b_1g_b, \\ \frac{dx(t)}{dt} = -b_2x(t) + b_3(i(t) - i_b), \\ \frac{di(t)}{dt} = b_4(g(t) - b_5)^+ - b_6(i(t) - i_b), \end{cases} \quad (1)$$

где  $t \geq 0$  — время;  $g(t)$  — концентрация глюкозы в крови;  $i(t)$  — концентрация инсулина в крови;  $x(t)$  — вспомогательная переменная, описывающая зависимость концентрации инсулина в крови от количества поглощенной глюкозы;  $g_b$  — базовый уровень глюкозы в крови (гликемия);  $i_b$  — базовый уровень инсулина в крови;  $b_0 - b_7$  — известные константы;

$$(f)^+ = \begin{cases} 0, & f \leq 0, \\ f, & f > 0. \end{cases}$$

Недостатком модели (1) является ее некорректность — неустойчивость при некоторых условиях.

1.1.2. *Модель Стариса (J. Sturis) [2].* Основываясь на двух отрицательных обратных связях, описывающих поглощение глюкозы инсулином и выделение инсулина поджелудочной железой в зависимости от количества поступившей глюкозы, Старис с соавторами разработали математическую модель, которая описывается системой ОДУ 6-го порядка:

$$\begin{cases} \frac{dg(t)}{dt} = g_{in} - f_2(g(t)) - f_3(g(t))f_4(i(t)) + f_5(x_3(t)), \\ \frac{di_p(t)}{dt} = f_1(g(t)) - e\left(\frac{i_p(t)}{v_p} - \frac{i_i(t)}{v_i}\right) - \frac{i_p(t)}{t_p}, \\ \frac{di_i(t)}{dt} = e\left(\frac{i_p(t)}{v_p} - \frac{i_i(t)}{v_i}\right) - \frac{i_p(t)}{t_i}, \\ \frac{dx_1(t)}{dt} = \frac{3}{t_d}(i_p(t) - x_1(t)), \\ \frac{dx_2(t)}{dt} = \frac{3}{t_d}(x_1(t) - x_2(t)), \\ \frac{dx_3(t)}{dt} = \frac{3}{t_d}(x_2(t) - x_3(t)). \end{cases} \quad (2)$$

В системе ОДУ (2) приняты следующие обозначения:  $g(t)$  — масса глюкозы в крови;  $i_p(t), i_i(t)$  — масса инсулина в крови и межклеточном пространстве соответственно;  $v_p(t), v_i(t)$  — скорости диффузии инсулина в плазме и межклеточном пространстве соответственно;  $e$  — параметр, определяющий эти скорости;  $t_p, t_i$  — временные константы, характеризующие понижение концентрации инсулина в крови и межклеточном пространстве соответственно;  $x_1(t), x_2(t), x_3(t)$  — дополнительные переменные, определяющие временные задержки распространения инсулина;  $f_1(g)$  — функция, моделирующая выработку инсулина поджелудочной железой;  $f_2, f_3, f_4$  — функции, моделирующие поглощение глюкозы различными частями тела ( $f_2$  — нервными клетками и клетками мозга,  $f_3, f_4$  — клетками мышц и жировыми клетками);  $f_5$  — функция, моделирующая расщепление глюкозы и вывод продуктов расщепления в печень;  $t_d$  — время расщепления глюкозы.

Здесь и далее величина  $g_{in}$  представляет собой начальное значение уровня ВГ.

**1.1.3. Компарментальная модель Кобелли** (С. Cobelli) и др. [3]. Она состоит из трех подмоделей, образующих систему ОДУ:

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = NHGB(x_1, u_{1,2}, u_2) - f_3(x_1) - \\ - f_4(x_1, u_{1,3}) - f_5(x_1) + I_x(t), \\ \frac{du_{1,1}}{dt} = -(m_{0,1} + m_{2,1} + m_{3,1})u_{1,1} + \\ + m_{1,1}u_{1,2} + m_{1,3}u_{1,3} + I_u(t), \\ \frac{du_{1,2}}{dt} = -(m_{0,2} + m_{1,2})u_{1,2} + m_{2,1}u_{1,1}, \\ \frac{du_{1,3}}{dt} = m_{1,3}u_{1,3} + m_{3,1}u_{1,2}, \\ \frac{du_2}{dt} = h_{0,2}u_2 + f_7(x_1, u_{1,3}). \end{cases} \quad (3)$$

Модель подкожного всасывания инсулина описывает динамику инсулина в подкожной ткани и представляет собой трехкомпарментальную модель, в которой компарментами являются уровни инсулина  $u_{1,1}, u_{1,2}, u_{1,3}$ . Модель глюкозного метаболизма описывает динамику ВГ и является однокомпарментальной моделью с компарментом "уровень глюкозы"  $x_1$ . Модель движения глюкозы из крови в подкожную ткань — однокомпарментальная модель с компарментом "уровень глюкагона"  $u_2$ .

В уравнениях (3) приняты следующие обозначения:  $NHGB = f_1(x_1, u_{1,2}, u_2) - f_2(x_1, u_{1,2})$ ;  $f_i$ ,

$i \in [1 : 7]$  — сигмоидальные функции, описывающие распространение и поглощение глюкозы и инсулина в организме пациента;  $u_{1,1}$  — измеренный уровень инсулина в плазме (*plasma insulin*);  $u_{1,2}$  — измеренный уровень отработанного инсулина (*liver insulin*);  $u_{1,3}$  — измеренный уровень промежуточного инсулина (*interstitial insulin*);  $u_2$  — уровень глюкагона;  $x_1$  — уровень ВГ;  $I_x, I_u$  — тестовые входы (уровни инсулина и глюкозы в крови);  $m_{i,j}, h_{0,2}$  — известные константы.

Таким образом, компарментами модели являются переменные  $x_1, u_{1,1}, u_{1,2}, u_{1,3}, u_2$ . Вхождение переменных, стоящих под знаком производных, в правые части уравнений обеспечивает связь между компарментами и тем самым между указанными подмоделями.

**1.1.4. Модель Никита** (К. S. Nikita) и др. [4]. Эта модель включает три следующие модели, которые в совокупности описывают уровень содержания ВГ: модель поглощения инсулина ультракороткого действия ( $CM_1$ ); модель поглощения инсулина короткого действия ( $CM_2$ ); модель распространения углеводов ( $CM_3$ ).

Модели  $CM_1, CM_2$  описывают концентрацию ВГ, а модель  $CM_3$  отвечает за изменение концентрации ВГ, обусловленное приемом пациентом углеводов с пищей. Модели  $CM_1, CM_2$  задаются ОДУ вида

$$\frac{di}{dt} = \frac{st^s T_{50}^s d}{V_i t (T_{50}^s + t^s)} - k_e t, \quad (4)$$

где  $T_{50} = ad + b$  — время всасывания половины введенного инсулина;  $d$  — количество введенного инсулина;  $s, a, b, k_e$  — известные константы;  $V_i$  — объем распределения введенного инсулина. Для модели  $CM_3$  используется уравнение

$$\frac{dg_{gut}}{dt} = g_{empt} - k_{gabs} g_{gur} \quad (5)$$

где  $g_{empt}$  — функция переваривания пищи кишечником;  $k_{gabs}$  — коэффициент всасывания глюкозы;  $g_{gut}$  — количество потребленной глюкозы.

**1.1.5. Модель S. G. Mougiakakou** и др. [5]. Она включает пять следующих моделей в виде ОДУ:  $M_1—M_4$  — модели динамики инсулина ультракороткого, короткого, среднего и продленного действия соответственно;  $M_5$  — модель динамики всасывания углеводов, поступивших с пищей. Модели  $M_1—M_4$  описываются уравнением (4) и отличаются друг от друга только значениями констант, зависящих от типа инсулина. Модель  $M_5$  описывается уравнением (5).

## 1.2. Модели на основе ОДУ с запаздывающим аргументом

### 1.2.1. Модель Энгельборга (K. Engelborghs) [2].

Эта модель основана на модели Стариса и существует в двух вариантах (см. п. 1.1.2).

Первый вариант модели Энгельборга описывает динамику инсулина, учитывая только временные задержки между выработкой инсулина и расщеплением глюкозы, и имеет вид

$$\begin{cases} \frac{dg(t)}{dt} = g_{in} - f_2(g(t)) - f_3(g(t))f_4(i(t)) + \\ + f_5(i(t - \tau_2)), \\ \frac{di(t)}{dt} = f_1(g(t)) - \frac{i(t)}{t_1}, \end{cases} \quad (6)$$

где  $\tau_2$  — временная задержка между выработкой инсулина и расщеплением глюкозы;  $t_1$  — величина, обратная скорости уменьшения количества инсулина в крови. Важной особенностью модели (6) является ее устойчивость.

Во втором варианте модели Энгельборга принята попытка моделировать динамику распространения инсулина при его инъекции. Однако при этом авторы модели делают допущение о том, что функция, моделирующая инъекцию инсулина, совпадает с функцией распространения естественного инсулина  $f_1$ . Модель имеет вид

$$\begin{cases} \frac{dg(t)}{dt} = g_{in} - f_2(g(t)) - f_3(g(t))f_4(i(t)) + \\ + f_5(i(t - \tau_2)), \\ \frac{di(t)}{dt} = \alpha f_1(g(t)) - \frac{i(t)}{t_1} + (1 - \alpha)f_1(g(t - \tau_1)), \end{cases}$$

где  $\alpha$  — весовой коэффициент, определяющий степень влияния естественного и искусственного инсулина;  $\tau_1$  — временная задержка выработки естественного инсулина.

**1.2.2. Первая модель Беннета и Гоурли (D. L. Bennett, S. A. Gourley) [2].** В этой модели для описания динамики глюкозы и инсулина используется система ОДУ с запаздывающим аргументом (см. п. 1.1.2):

$$\begin{cases} \frac{di_p(t)}{dt} = f_1(g(t)) - e\left(\frac{i_p(t)}{v_p} - \frac{i_i(t)}{v_i}\right) - \frac{i_p(t)}{t_p}, \\ \frac{di_i(t)}{dt} = e\left(\frac{i_p(t)}{v_p} - \frac{i_i(t)}{v_i}\right) - \frac{i_i(t)}{t_i}, \\ \frac{dg(t)}{dt} = g_{in} - f_2(g(t)) - qg(t)f_4(i_i(t)) + \\ + f_5(i_p(t - \tau)). \end{cases}$$

Здесь  $\tau \geq 0$  — временная задержка выработки инсулина;  $q > 0$  — величина, которая определяет скорость расщепления глюкозы инсулином в крови.

**1.2.3. Вторая модель Беннета и Гоурли [2].** Она представляет собой упрощенную модель (7). Модель также учитывает временную задержку в выработке инсулина по отношению ко времени поступления глюкозы в кровь и имеет вид

$$\begin{cases} \frac{dg(t)}{dt} = g_{in} - f_2(g(t)) - f_3(g(t))f_4(i(t)) + \\ + f_5(i(t - \tau_2)), \\ \frac{di(t)}{dt} = f_1(g(t - \tau_1)) - d_i i(t), \end{cases}$$

где  $i(t) = i_0$  для любых  $t$  из промежутка  $[-\tau_2, 0]$ ,  $i(0) = i_0 > 0$ ,  $g(0) = g_0 > 0$ ,  $g(t) = g_0$  для любых  $t$  из промежутка  $[-\tau, 0]$ ;  $\tau_1$  — время задержки выработки инсулина;  $\tau_2$  — время задержки расщепления глюкозы;  $d_i$  — скорость уменьшения количества инсулина в крови.

## 1.3. Модели на основе интегро-дифференциальных уравнений

**Модель де Гаetano и Арино (A. De Gaetano, O. Arino) [2]** разработана на основе модели Бергмана (1). Выполнив формальный математический анализ этой модели, де Гаetano и Арино предложили ее улучшенный вариант, названный ими динамической моделью (*dynamic model*):

$$\begin{cases} \frac{dg(t)}{dt} = -b_1 g(t) - b_4 i(t)g(t) + b_7, \\ \frac{di(t)}{dt} = -b_2 i(t) + \frac{b_6}{b_5} \int_{t-b_5}^t g(s) ds. \end{cases}$$

Здесь  $g(t) = g_b$ ,  $t \in [-b_5, 0]$ ,  $g(0) = g_b + b_0$ ,  $i(0) = i_b + b_3 b_0$ ; значение параметра  $b_5$  определяется базальным уровнем глюкозы  $g_b$ ;  $i_b$  — базальный уровень инсулина.

## 1.4. Модели на основе дифференциальных уравнений в частных производных

В работе Уоч (P. Wach) и др. [2] рассмотрена модель динамики инсулина и глюкозы на основе дифференциальных уравнений в частных производных (ДУЧП), полученная при допущении, что вводимый раствор инсулина распространяется в подкожной ткани только в виде гексамерных и димерных молекул, причем проникать в капилляры могут только димерные молекулы. Модель представляет собой систему двух дифференциальных уравнений в частных производных

$$\begin{cases} \frac{\partial h}{\partial t} = p(qd^3 - h) + D\nabla^2 h, \\ \frac{\partial d}{\partial t} = -p(qd^3 - h) + D\nabla^2 d - bd, \end{cases}$$

где  $h$  и  $d$  — концентрация димерного и гексамерного инсулина соответственно;  $p$  — постоянная скорости;  $q$  — химическая постоянная равновесия;  $D$  — диффузионная постоянная;  $b$  — постоянная скорости поглощения инсулина.

## 2. Нейросетевые алгоритмы прогнозирования значений уровня ВГ

### 2.1. Нейронные сети прямого распространения

**2.1.1. Трехслойная нейронная сеть** [3]. Она содержит  $(n_1 + n_2)$  нейронов во входном слое,  $n_1$  нейронов — в скрытом слое и один нейрон — в выходном слое.

Входами сети являются значения уровней ВГ  $y(t-1), y(t-2), \dots, y(t-n_1)$  и инсулина  $u(t-1), u(t-2), \dots, u(t-n_2)$  в моменты времени  $(t-1), (t-2), \dots$ . Значение на выходе нейронной сети интерпретируется как уровень подкожного содержания глюкозы в следующий момент времени. В качестве функции активации нейронов используется обратная квадратичная функция (*reciprocal multiquadric function*). Обучение сети реализовано на основе модифицированного алгоритма метода наименьших квадратов.

**2.1.2. Опережающая (feed-forward) нейронная сеть** (далее FFNN) [5]. Эта сеть является полносвязной, трехслойной (типы используемых нейронов в публикации не указаны).

На вход сети подаются следующие величины (см. п. 1.1.5): последнее измеренное значение ВГ; выходная величина модели  $M_1$  в моменты времени  $(t-1), (t-2), (t-3), (t-4)$ ; выходная величина модели  $M_2$  в моменты времени  $(t-1), (t-2)$ ; выходная величина модели  $M_3$  в момент времени  $(t-1)$ ; выходная величина модели  $M_4$  в момент времени  $(t-1)$ ; выходная величина модели  $M_5$  в моменты времени  $(t-1), (t-2), (t-3), (t-4)$ . Выходом сети является прогнозируемое значение уровня ВГ. Для обучения сети используется алгоритм обратного распространения ошибки.

### 2.2. Рекуррентные нейронные сети

**2.2.1. Рекуррентная сеть Элмана** [6]. Эта сеть состоит из входного, скрытого, контекстного и выходного слоев (рис. 1).

Входной слой сети содержит два нейрона, на входы которых поступают текущие значения уровня инсулина и уровня ВГ. Скрытый слой может содержать от 1 до 10 нейронов — единственным условием является равенство числа нейронов скрытого и

контекстного слоев. Контекстный слой обеспечивает обратную связь. Выходы скрытого слоя связаны с входами выходного слоя и одновременно с входами контекстного слоя. Выходные сигналы контекстного слоя поступают на входы скрытого слоя и с задержкой — на входы контекстного слоя. Выходом сети является прогнозируемое следующее значение уровня ВГ.

Для нейронов скрытого слоя в качестве функции активации нейронов используется гиперболический тангенс, для нейронов выходного слоя — линейная функция. Веса связей скрытого и контекстного слоев равны единице, остальные веса подбираются в процессе обучения сети. Для обучения нейронной сети используется алгоритм обратного распространения ошибки.

**2.2.2. Рекуррентная сеть Элмана** [7]. Эта сеть аналогична нейронной сети, рассмотренной в п. 2.2.1. Она не имеет контекстного слоя, и выход каждого из нейронов скрытого слоя через задержку на один временной шаг поступает на входы всех нейронов этого слоя.

На вход нейронной сети поступает пять векторов: вектор, содержащий информацию об инсулине, включая его тип, время и место инъекции; вектор, определяющий количество потребленных углеводов; вектор, содержащий информацию о физической нагрузке, включая информацию о длительности, интенсивности и подвижности нагрузки; уровень ВГ; вектор, включающий в себя информацию о стрессах, болезнях пациента и т. д. Выходом сети является прогнозируемое значение уровня глюкозы в крови пациента.

Для обучения сети использовались две модификации рекуррентного алгоритма обучения в реальном времени (*real time recurrent learning* — RTRL) — с учителем (RTRL-TF) и без учителя (RTRL-FR).

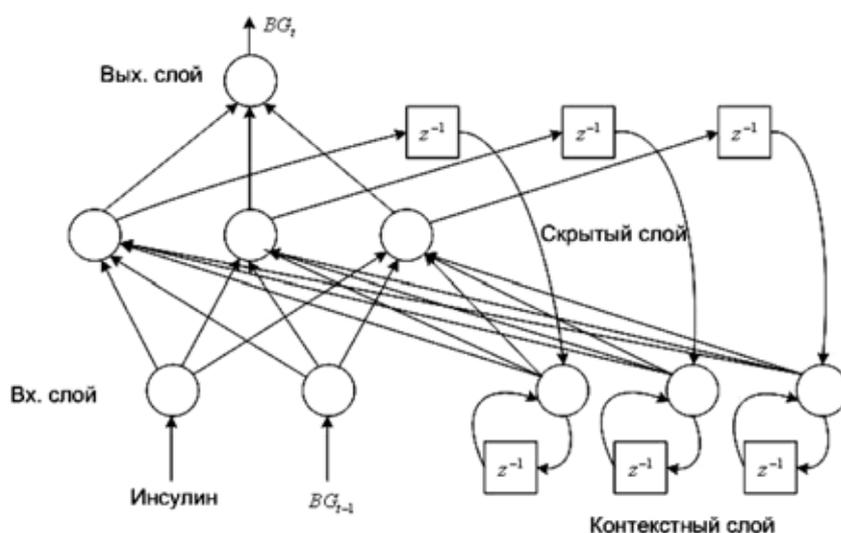


Рис. 1. Схема нейронной сети Элмана [6] ( $z^{-1}$  — задержка на один временной шаг)

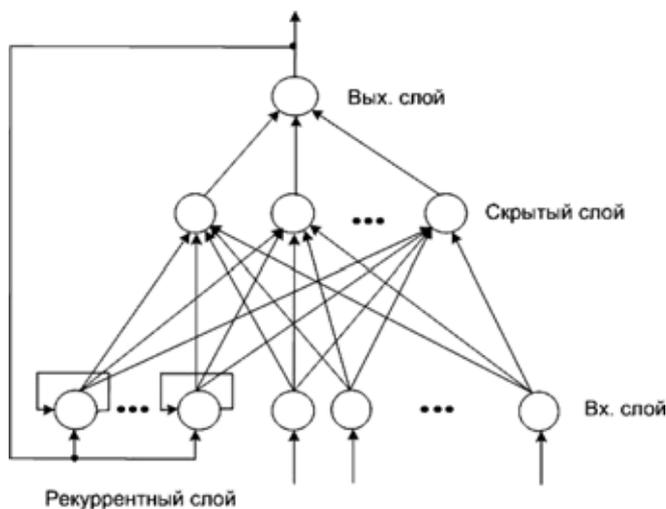


Рис. 2. Схема рекуррентной нейронной сети [4]

**2.2.3. Трехслойная рекуррентная сеть** [4]. Она также состоит из входного, скрытого и выходного слоев (рис. 2). Нейроны входного слоя разделены на две группы. На входы первой группы нейронов поступают входные параметры сети, на входы второй группы поступает значение с выхода сети. Тем самым вторая группа нейронов образует рекуррентный слой. Число нейронов скрытого слоя выбирается равным 5...15. Функция активации нейронов скрытого слоя — сигмоидальные функции, нейронов выходного слоя — линейная функция.

На вход нейронной сети поступает три выходных значения математической модели пациента (см. п. 1.1.4), а также текущий уровень ВГ. Выходом сети является прогнозируемое значение уровня ВГ. Для обучения сети использовались алгоритмы RTRL-RF и RTRL-FR.

### 3. Нейросетевые алгоритмы прогнозирования требуемых доз инсулина

#### 3.1. Нейронные сети прямого распространения

**3.1.1. Перцептронная сеть с линейными функциями активации** [8]. Эта сеть является трехслойной. В первом слое сети содержится 12 нейронов (по одному на каждый вход), в скрытом слое — 4 нейрона, в выходном слое — 1 нейрон.

На входы нейронной сети подаются следующие 12 величин: уровень глюкозы в крови в данном временном интервале  $g_t$ ; уровни глюкозы в крови в два предыдущих момента времени  $g_{t-1}$ ,  $g_{t-2}$ ; уровни глюкозы в крови в данный и следующий момент времени прошлого дня  $g_{t-10}$ ,  $g_{t-9}$ ; бинарная величина, единичное значение которой означает, что имел место дополнительный прием пищи в данном временном интервале  $s_t$ ; количество инсулина, введенного для купирования гипергликемий в данном временном интервале  $i_t$ ;

$bolus$  за два предыдущих интервала времени  $d_{t-1}$ ,  $d_{t-2}$ ;  $basal$  с начала дня  $d_m$ ;  $bolus$  в данный момент прошлого дня  $d_{t-10}$ ; нормализованный  $bolus$  в данный момент прошлого дня  $d_{t-10}$  (нормализация учитывает отклонение  $bolus$  от стандартных значений, которые определяются диабетологами).

Выход нейронной сети соответствует рекомендуемой дозе инсулина в данный интервал времени. Для обучения сетей используется метод обратного распространения ошибки.

**3.1.2. Перцептронная сеть с сигмоидальной функцией активации** [9]. Эта сеть является трехслойной. Первый и скрытый слой сети содержат по 5 нейронов, выходной слой — 1 нейрон.

В качестве входов в сеть используются следующие величины: текущий уровень ВГ; текущая доза за каждого из трех типов инсулинов; бинарная переменная  $s_t$  (см. п. 3.1.1); бинарная переменная, принимающая единичное значение в том случае, когда в данном временном периоде имела место физическая нагрузка; разница во времени между текущим и предыдущим значением ВГ.

Выходом сети является рекомендуемая доза инсулина. Для обучения сети используется известный алгоритм Левенберга—Марквардта.

**3.1.3. Сеть с радиальными базисными функциями** [9]. Эта сеть также является трехслойной. Входной слой содержит 5 нейронов, выходной слой — 1 нейрон. Число нейронов скрытого слоя рекомендуется подбирать в процессе обучения.

Выходом сети является рекомендуемая доза инсулина. В качестве входных в сети используются величины, аналогичные таким же величинам для нейронной сети, рассмотренной в п. 3.1.2. Обучение сети осуществляется методом градиентного спуска.

**3.1.4. Сеть с функцией активации в виде гиперболического тангенса** [10]. Эта сеть служит для кластеризации входных данных в САУ уровнем ВГ (см. п. 5.1.3). Она используется в качестве промежуточной сети — ее выходы интерпретируются другой сетью, которая имеет в качестве выхода уже уровень ВГ или следующей дозы инсулина. Сеть является трехслойной и содержит 11 нейронов во входном слое, 16 нейронов в скрытом слое (определено опытным путем) и 6 нейронов в выходном слое.

Входные сигналы нейронной сети в работе не рассмотрены. Выходы нейронной сети являются бинарными, и в каждый момент времени только один из них принимает значение 1. Номер выходного нейрона с единичным значением соответствует номеру режима второй сети. Для обучения сети используется алгоритм обратного распространения ошибки.

#### 3.2. Нечеткие нейронные сети

В работе [11] рассматривается **семислойная нейронная сеть**, слою которой выполняют следую-

щие функции: входной слой (*input layer*) принимает входные данные; слой 1 (*input label layer*) проводит кластеризацию входных данных методами нечеткой логики; в слое 2 (*rule layer*) из множества входных данных осуществляется выборка тех данных, которые соответствуют нечетким правилам; каждый нейрон слоя 3 (*consequent layer*) реализует некоторый логический вывод, определяемый как взвешенная сумма правил предыдущего слоя; слой 4 (*output possibility layer*) разделяет данные, полученные в предыдущем слое, на группы; слой 5 (*output label layer*) формирует решение задачи, которое интерпретируется выходным слоем; выходной слой (*output layer*) состоит из одного нейрона и формирует значение дозы инсулина, которую рекомендуется ввести в следующий момент времени.

Для обучения нейронной сети используется двухэтапный алгоритм: на первом этапе с помощью многоступенчатого алгоритма квантования векторов (*multistage lattice vector quantization — MLVQ*) выполняется кластеризация данных и построение нечеткой функции принадлежности (*fuzzy membership functions*) входов и выходов; на втором этапе на основе алгоритма однопроходной идентификации правил (*novel one-pass rule-identification algorithm*) проводится идентификация нечетких правил.

#### 4. Системы прогнозирования следующих значений уровня $BG$

##### 4.1. Системы на основе рекуррентной сети Элмана

**4.1.1. Система прогнозирования следующего уровня  $BG$**  [6], построенная на основе нейронной сети Элмана (см. п. 2.2.1). Выбор сети Элмана обосновывается рядом преимуществ этой сети по сравнению с сетями с прямыми связями. Прогнозируемое значение уровня инсулина зависит от многих факторов в предыдущие моменты времени, поэтому сеть должна хранить некоторую информацию о них. В прямой сети это достигается использованием "скользящего" окна во входном слое, что требует большого количества нейронов во входном слое и влечет за собой высокую сложность обучения сети. В сети Элмана хранение информации о предыдущих моментах времени реализуется с помощью обратных связей, и сеть лишена указанного недостатка сетей с прямыми связями.

**4.1.2. Система на основе трехслойной нейронной сети.** Эта система рассмотрена в п. 2.2.3, исследована в работе [4]. Методом проб и ошибок получено оптимальное значение числа нейронов в рекуррентном слое, равное 95.

##### 4.2. Системы, использующие модель пациента в виде ОДУ и рекуррентную нейронную сеть

**4.2.1. Система, в которой в качестве математической модели (ММ) пациента** используется сис-

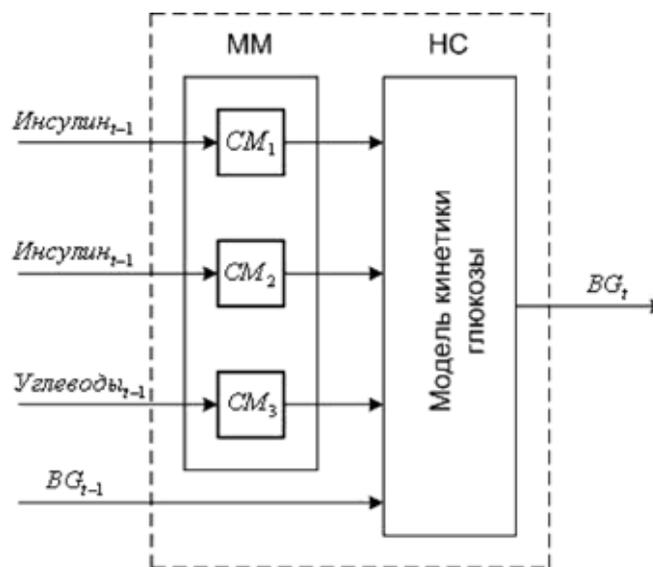


Рис. 3. Структура системы [4]: ММ — математическая модель пациента; НС — нейронная сеть;  $CM_1$ — $CM_3$  — компоненты математической модели пациента

тема ОДУ [4]. Она приведена в п. 1.1.4, рассмотрена в работе [4] и на рис. 3. Используемая в системе нейронная сеть рассмотрена в п. 2.2.2.

Нейронная сеть (НС) моделирует кинетику глюкозы в организме. Входами сети являются выходы математических моделей  $CM_1$ ,  $CM_2$ ,  $CM_3$ , а также значение содержания глюкозы в крови в предыдущий момент времени  $BG_{t-1}$ .

При экспериментальной проверке системы наилучшие результаты были получены для двух сетей: сети с 5 нейронами в скрытом слое и алгоритмом обучения RTRL-FR; сети с 15 нейронами в скрытом слое и алгоритмом обучения RTRL-TF.

**4.2.2. Система, использующая в качестве математической модели пациента систему из пяти ОДУ.** Она рассмотрена в п. 1.1.5, исследована в работе [5]. Математический модуль системы включает в себя пять модельных ОДУ (см. п. 1.1.5). Все ОДУ интегрируются методом Рунге—Кутты 4-го порядка с шагом по времени, равным 5 мин. Нейросетевой модуль системы используется для прогнозирования уровня  $BG$  на основании последнего измерения  $BG$  и результатов интегрирования ОДУ. Предполагается непрерывное измерение уровня  $BG$  и как непрерывное, так и дискретное введение инсулина.

Рассматриваются два варианта архитектуры нейронной сети — полносвязная трехслойная FFNN сеть прямого распространения, рассмотренная в п. 2.1.2; рекуррентная нейронная сеть (см. п. 2.2.3).

По результатам тестирования система на основе сети FFNN, а также система на основе рекуррентной сети с RTRL-TF обучением показали существенно лучшие результаты по сравнению с сис-

темой на основе рекуррентной сети с RTRL-FR обучением. При этом система на основе рекуррентной сети с RTRL-TF обучением продемонстрировала существенные преимущества перед системой на основе сети FFNN, поскольку имеет возможность дополнительно обучаться в процессе функционирования.

## 5. Нейросетевые системы прогнозирования требуемых доз инсулина

### 5.1. Системы на основе сетей прямого распространения

**5.1.1. Система на основе нейронной сети прямого распространения** (см. п. 3.1.1). Эта система рассмотрена в работе [8]. В ней используется неравномерное дискретное время: сутки делятся на 10 интервалов (окон) длительностью по 2,5–3 ч; каждому из этих интервалов соответствует фиксированное время  $t$  измерений ВГ.

**5.1.2. Система на основе трехслойных нейронных сетей с прямыми связями.** Она рассмотрена в работе [9]. В системе используются нейронные сети, описание которых приведено в пп. 3.1.2, 3.1.3, а также так называемая полиномиальная сеть.

Результаты тестирования показали, что наиболее удачной является система, построенная на основе нейронной сети, рассмотренной в п. 3.1.2, — на основе трехслойной персептронной нейронной сети с сигмоидальными функциями активации нейронов.

**5.1.3. Система на основе двух нейронных сетей прямого распространения.** Она обсуждается в работе [10]. Первая (кластеризирующая) сеть выявляет паттерны в значениях ВГ и инсулина за день и классифицирует все указанные значения (см. п. 3.1.4). На основе того, к какому кластеру принадлежит текущее значение ВГ, устанавливается один из режимов работы второй сети, которая определяет оптимальные дозы инсулина. Таким образом, вторая нейронная сеть в качестве входных использует шесть значений ВГ, соответствующих каждому из кластеров.

### 5.2. Системы на основе нечеткой нейронной сети

**5.2.1. Система прогнозирования доз инсулина** [11]. Эта система построена на основе нейронечеткой сети (см. п. 3.2.1). Предполагается, что введение инсулина и измерение уровня ВГ осуществляется непрерывно, хотя система может применяться и для прогнозирования дискретных доз инсулина. Рассматриваются два варианта использования системы — с коррекцией доз инсулина на основе модели метаболизма здорового человека и без этой модели. В последнем случае на вход сети подаются следующие величины: отклонение ВГ

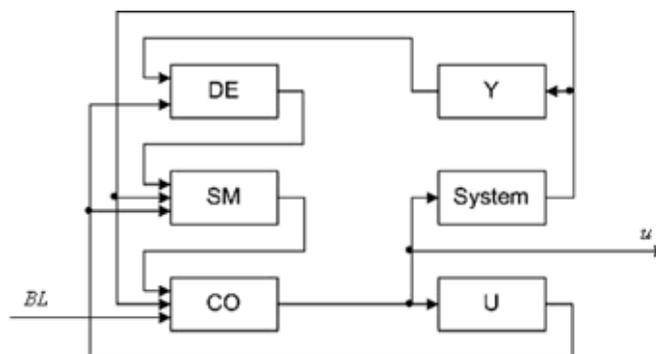


Рис. 4. Структура системы [12]: DE, SM, CO — нейронные сети; Y, U — буферы; System — системный блок;  $u$  — рекомендуемая доза инсулина

в предыдущий момент времени от целевого значения; различные производные от ВГ в предыдущий момент времени.

### 5.3. Системы на основе нейронной сети с буферизацией

**5.3.1. Система на основе нейронных сетей с буферизацией** [12]. Она функционирует в дискретном времени и состоит из трех основных вспомогательных блоков, двух вспомогательных блоков и системного блока (рис. 4).

Основными блоками системы являются блок вычисления отклонения нейронной сети (DE), блок системной модели нейронной сети (SM) и управляющий блок оптимизации нейронной сети (CO). К вспомогательным блокам системы относятся буфер для хранения уровня глюкозы (Y) и буфер для хранения значений уровня инсулина (U). На вход системы подается текущее значение глюкозы в крови ВГ. На выходе системы — рекомендованное значение дозы инсулина  $u$ .

Все три основных блока системы DE, SM и CO представляют собой последовательно связанные нейронные сети. В каждый момент времени значения уровня глюкозы и инсулина записываются в соответствующие буферы. Данные из буфера Y поступают на вход сети DE, а данные из буфера U — на входы сетей SM, DE. На входы сетей SM, CO подаются также выходные данные блока System.

Конкретная архитектура сетей в работе [12] не указывается, но отмечается возможность использования как сетей с прямыми связями, так и рекуррентных сетей. В качестве функций активации нейронов во всех случаях рекомендуется использовать сигмоидальные функции. Алгоритм обучения сетей DE, SM, CO определяется их архитектурой, но во всех случаях обучение должно проводиться в следующем порядке: сначала сеть DE, а затем сети SM, CO.

## 6. Комбинированные системы прогнозирования требуемых доз инсулина

### 6.1. Системы, использующие модель пациента в виде ОДУ и нейронную сеть прямого распространения

Комбинированная система, рассмотренная в работе [3], предназначена для определения необходимых доз инсулина при непрерывных измерениях ВГ и непрерывном введении инсулина (рис. 5).

Система состоит из трех основных модулей: математической модели глюкозно-инсулинового метаболизма пациента; нейронной сети, предсказывающей следующие значения уровня ВГ; предиктора-контроллера, выходом которого является оптимальная доза инсулина в данный момент времени; временных линий задержки.

В качестве *математической модели пациента* используется система ОДУ, рассмотренная в п. 1.1.3. Такая модель позволяет вычислить количество поглощенного инсулина при однократной инъекции. При непрерывном введении инсулина это количество может быть рассчитано как результат нескольких инъекций.

Прогнозирование следующих значений ВГ осуществляется с помощью трехслойной рекуррентной нейронной сети с радиальной базисной функцией активации нейронов (см. п. 2.2.1). Поскольку выходные переменные математической модели (компарменты  $x_1, u_{1,1}, u_{1,2}, u_{1,3}, u_2$ ) не могут быть использованы непосредственно для обработки указанной нейронной сетью, эти выходы предварительно преобразуются по формулам

$$y_1 = \frac{x_1}{V_1}, y_2 = \frac{u_{1,1}}{V_{1,1}}, y_3 = \frac{u_{1,2}}{V_{1,2}},$$

$$y_4 = \frac{u_{1,3}}{V_{1,3}}, y_5 = \frac{u_2}{V_2},$$

где  $V_i, V_{i,j}$  — нормированные значения компарментов (процентные отношения к весу пациента).

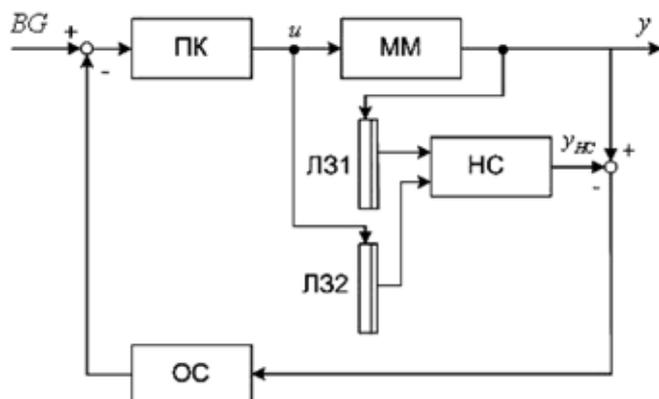


Рис. 5. Структура системы [3]: ПК — предиктор-контроллер; MM — математическая модель пациента; НС — нейронная сеть; ЛЗ — линия задержки; ОС — обратная связь;  $u$  — рекомендуемая доза инсулина;  $y$  — прогнозируемый уровень ВГ

*Предиктор-контроллер* реализует алгоритм управления уровнем ВГ в условиях больших временных задержек и высокого уровня шума. Алгоритм базируется на минимизации целевой функции, построенной на основе разности между предсказанным и целевым значениями ВГ. Схема одного шага алгоритма такова:

- вычисление целевых значений ВГ в  $N$  следующих моментах времени;
- вычисление на основе математической модели пациента и модели глюкозно-инсулинового метаболизма прогнозируемых значений уровня ВГ в те же  $N$  следующих моментах времени;
- вычисление среднего квадратичного отклонения предсказанных значений уровня ВГ от их целевых значений;
- минимизация указанного среднего квадратичного отклонения;
- реализация управляющего воздействия, соответствующего первому из рассматриваемых моментов времени.

При минимизации среднего квадратичного отклонения в качестве варьируемых параметров используются длина диапазона прогнозируемых значений ВГ, длина диапазона контролируемых значений ВГ, вес прогнозируемого значения ВГ, вес контролируемого значения ВГ.

Временные линии задержки используются для преобразования входных сигналов  $u(t)$  и  $y(t)$  в вектор, подходящий для обработки нейронной сетью.

### 6.2. Системы, использующие модель пациента в виде ОДУ и рекуррентную нейронную сеть

Система, исследованная в работе [13], имеет структуру, близкую к структуре системы, которая рассмотрена в п. 6.1. Основное отличие заключается в использовании рекуррентной нейронной сети вместо сети прямого распространения, что позволило избавиться от линий задержки. Входами сети являются следующие величины: выход сети в предыдущий момент времени ( $t - 1$ ); текущее значение ВГ (измеренное CGMS); скорость введения инсулина в предыдущий момент времени ( $t - 1$ ).

Выходом сети является предполагаемое изменение уровня ВГ в данный момент времени  $t$ . Подбор оптимальных доз инсулина обеспечивает нелинейный предиктор-контроллер, полностью идентичный контроллеру, рассмотренному в п. 6.1. В качестве алгоритма обучения сети используется RTRL-алгоритм.

## Заключение

Современные САУ уровнем глюкозы в крови пациента используют широкий класс математических моделей динамики инсулина и глюкозы в его теле: модели, построенные на основе ОДУ; моде-

ли на основе ОДУ с запаздывающим аргументом; модели на основе интегро-дифференциальных уравнений; модели на основе дифференциальных уравнений в частных производных. Для прогнозирования оптимальных доз искусственного инсулина в этих САУ широко используется нейросетевые алгоритмы, на базе различных нейронных сетей — нейронных сетей прямого распространения, рекуррентных нейронных сетей, а также нечетких нейронных сетей.

САУ уровнем глюкозы в крови пациента используют, как правило, неравномерное дискретное время и делятся на два больших класса — системы, не использующие математических моделей пациента и использующие такие модели.

САУ первого класса строят на основе одной или нескольких прогнозирующих нейронных сетей. Для хранения уровней глюкозы и инсулина в предыдущие дискретные моменты времени могут использоваться специальные буферные устройства.

САУ второго класса включают в себя, как правило, математический и нейросетевой модули, а также, возможно, ряд вспомогательных устройств (контроллер, буферные устройства и т. д.). Математический модуль такой САУ реализует модель пациента в виде ОДУ, интегро-дифференциальных уравнений или уравнений в частных производных. Эта модель предназначена для вычисления количества поглощенного инсулина при однократной инъекции. Нейросетевой модуль реализует модель глюкозно-инсулинового метаболизма, которая предсказывает следующее значение уровня глюкозы в крови пациента.

Особенностью САУ уровнем глюкозы в крови пациента, существенно затрудняющей задачу их построения, является то, что эти системы функционируют в условиях больших временных задержек и высокого уровня шума.

В настоящее время происходит интенсивный поиск оптимальных структур САУ уровнем глюкозы в крови пациента, и общепризнанные структуры таких систем отсутствуют. В то же время многие из реализованных САУ рассмотренных классов прошли широкую апробацию в клинических условиях и показали свою эффективность.

В целом, на основе данного обзора можно сделать следующий вывод. В настоящее время ак-

туальными являются разработка и исследование новых, более адекватных моделей пациента и его глюкозно-инсулинового метаболизма, а также разработка и исследование методов и алгоритмов синтеза САУ уровнем глюкозы в крови пациента.

#### Список литературы

1. **Binder C., Lauritzen T., Faber O.** Insulin pharmacokinetics // *Diabetes care*. 1984. Vol. 7. P. 188—199.
2. **Makroglou A., Li J., Kuang Y.** Mathematical models and software tools for the glucose-insulin regulatory system and diabetes: an overview // *Applied numerical mathematics*. 2006. Vol. 56. N 3—4. P. 559—573.
3. **Trajanoski Z., Wach P.** Neural predictive controller for insulin delivery using the subcutaneous route // *IEEE transaction on biomedical engineering*. 1988. Vol. 45. N 9. P. 1122—1134.
4. **Mougiakakou S. G., Prountzou K., Nikita K. S.** A real time simulation model of glucose-insulin metabolism for type I diabetes patients // *Engineering in Medicine and Biology Society: Proceedings of the 27th Annual International Conference of the IEEE*. Shanghai, China. 2005. P. 298—301.
5. **Mougiakakou S. G.** et al. A neural network based glucose-insulin metabolism models for children with type I. // *Engineering in Medicine and Biology Society: Proc. of the 28th Annual International Conference of the IEEE*. New York, USA. 2006. P. 3545—3548.
6. **Teufel E., Kletting M., Teich W. G.** et al. Modelling the glucose metabolism with backpropagation through time trained Elman nets // *Proc. of the 13th IEEE Workshop on Neural Networks for Signal Processing (NNSP'03)*. Toulouse, France, 2003. P. 789—798.
7. **Sandham W. A., Hamilton D. J., Jappx A., Pattersod K.** et al. Neural network and neuro-fuzzy systems for improving diabetes therapy // *Engineering in Medicine and Biology Society: Proc. of the 20th Annual International Conference of the IEEE*. Piscataway, NJ: IEEE, 1998. P. 1438—1441.
8. **Andrianasy F., Milgram M.** Applying neural networks to adjust insulin pump doses. // *Neural Networks for Signal Processing: Proceedings of the 1997 IEEE workshop*. New York, USA, 1997. P. 182—188.
9. **Towards R. A. Z.** Neural network model for insulin / glucose in diabetics-II // *Informatica*. 2005. N 29. P. 227—232.
10. **Mougiakakou S. G., Nikita K. S.** Neural network system for outpatient management of insulin dependent patients // *Engineering in Medicine and Biology*. 21st Annual Conference and the 1999 Annual Fall Meeting of the Biomedical Engineering Society: Proc. of the First Joint BMES/EMES Conference Serving Humanity. New York, USA. 1999. Vol. 2. P. 697.
11. **Phee H. K., Tung W. L., Quek C.** A personalized approach to insulin regulation using brain-inspired neural semantic memory in diabetic glucose control // *Proc. of the IEEE Congress on Evolutionary Computation 2007*. Montreal, Québec, Canada. 2007. P. 2644—2651.
12. **Alamaireh M. F.** A predictive neural network control approach in diabetes management by insulin administration. // *Proc. of the 2nd IEEE Conference Information and Communication Technologies*, 2006. ICTTA'06. Damascus, Syria. 2006. Vol. 1. P. 1618—1623.
13. **Zarkgiani K., Mougiakakou S. G.** et al. An insulin infusion advisory system for type I diabetes patients based on non-linear model predictive control methods // *Proc. of the 29th Annual International Conference of the IEEE EMBS*. Corfu, Greece, 2007. P. 5971—5974.

**В. А. Острейковский**, д-р техн. наук, проф.,  
Сургутский государственный университет,  
e-mail: ovaivt@mail.ru,

**Е. В. Дрожжин**, д-р мед. наук, проф., зав. каф.,  
зав. отд. сосудистой хирургии,

Сургутский государственный университет,  
Клиническая городская больница № 1,

**Д. А. Федоров**, ассистент,

Сургутский государственный университет,  
e-mail: fd\_demon@mail.ru

## О формализации предметной области интеллектуальной информационной системы поддержки принятия решений врачом

*Рассмотрены вопросы формализации предметной области интеллектуальной информационной системы (ИИС) поддержки принятия решений врачом-хирургом на примере ИИС "Атеросклероз". Методами корреляционного анализа проведена оценка выбора экспертов, согласованности их мнений, а также изучены факторы, вызывающие наибольший риск появления и развития облитерирующего атеросклероза сосудов нижних конечностей (ОАСНК), и определены клинические состояния, позволяющие наиболее полно диагностировать данное заболевание. Методами регрессионного анализа исследованы факторы, оказывающие наибольшее влияние на процесс лечения облитерирующего атеросклероза артерий нижних конечностей. Полученные результаты позволяют сформировать структуру баз данных и знаний, что является одной из самых трудоемких задач при разработке любой ИИС, в том числе и ИИС "Атеросклероз".*

**Ключевые слова:** формализация предметной области, экспертный анализ, интеллектуальная информационная система, система поддержки принятия решений, корреляционный и регрессионный анализ

В статье представлены результаты корреляционного и регрессионного анализа результатов анкетирования экспертов по облитерирующему атеросклерозу сосудов нижних конечностей (ОАСНК) для создания базы данных (БД) и базы знаний (БЗ) интеллектуальной информационной системы поддержки принятия решений врачом-хирургом (ИИСППРВ).

### Характеристика предметной области

Для сбора статистических данных о больных облитерирующим атеросклерозом сосудов ниж-

них конечностей было осуществлено анкетирование врачей. Основная задача анкетирования состояла в том, чтобы оценить степень важности ряда признаков по результатам диагностических мероприятий, лабораторных и инструментальных исследований, осмотра больного, выписки из его истории болезни и т. п. Для составления, анализа и интерпретации результатов анкетирования врачей применяли методы экспертных оценок. В роли экспертов выступали сосудистые хирурги и врачи смежного профиля Сургутских медицинских учреждений.

На основании работ [1–3] и консультации со специалистами по болезни ОАСНК были составлены две анкеты. Первая анкета содержала 32 фактора риска, которые выступают в качестве критериев возникновения и прогрессирования ОАСНК, такие как повышенное содержание холестерина в крови, возраст, пол, наследственная предрасположенность и т. д. Во второй анкете были представлены 16 клинических состояний ОАСНК, например, снижение пульсации на магистральных артериях, ишемические отеки голени, боли в нижних конечностях при нагрузках, боли в горизонтальном положении тела и т. д.

В анкетировании принимали участие врачи разной специализации — сердечно-сосудистые хирурги, терапевты, врачи ультразвуковой диагностики. Общая группа опрошенных врачей в составе 43 человек была разделена на две группы. Группа № 1: 18 экспертов с медицинским стажем от 3 до 37 лет, где средний стаж составил 16 лет. Группа № 2: 25 экспертов, общий медицинский стаж которых не превышал трех лет.

### Обработка данных анкетирования

Согласованность мнений экспертов оценивали с помощью коэффициента конкордации [4]:

$$W = \frac{12d}{m^2(n^3 - n)};$$

$$d = \sum_{i=1}^n \left[ \sum_{j=1}^m r_{ij} - \frac{1}{2} m(n+1) \right]^2,$$

где  $m$  — число экспертов;  $n$  — число критериев;  $r_{ij}$  — ранг  $i$ -го показателя по  $j$ -му эксперту;  $d$  — сумма квадратов отклонений всех оценок рангов каждого объекта экспертизы от среднего значения. Исходя из рассчитанных коэффициентов конкордации для анкеты "Факторы риска ОАСНК" согласованность группы № 1 составляет  $W_1 = 0,42$  и группы № 2  $W_2 = 0,51$ , для анкеты "Клинические состояния ОАСНК" согласованность группы № 1

**Факторы риска, упорядоченные по важности экспертами группы № 1**

№	Факторы риска	Эксперты группы № 1									Σ
		1	2	3	4	5	6	...	18		
		Ранги группы № 1 (18 врачей)									
1	Повышенное содержание холестерина	30	30	28	30	21	29	...	21	413	
2	Гиперлипидемия	30	30	28	30	21	29	...	3	408	
3	Низкие уровни холестерина ЛВП	30	30	28	30	18	22	...	31	406	
4	Возраст: 55—64 года	27	27	17	28	20	22	...	21	390	
5	Пол (муж.)	27	28	14	22	15	20	...	21	383	
6	Повышение концентрации триглицеридов	24	22	19	29	21	29	...	14	375	
7	Курение	20	23	19	15	21	28	...	21	369	

Таблица 2

**Факторы риска, упорядоченные по важности врачами группы № 2**

№	Факторы риска	Сумма рангов для группы № 2 (25 врачей)
1	Повышенное содержание в крови холестерина	666
2	Избыточное питание, особенно высококалорийное	651
3	Курение сигарет	579
4	Гиперлипидемия	579
5	Тромбогенные факторы	553
6	Возраст 55—64 года	548
7	Низкая физическая активность	512
...	...	...
13	НХЛВП	454
...	...	...
15	Повышение концентрации триглицеридов	439

$W_1 = 0,47$  и группы № 2  $W_2 = 0,52$ . Ряды предпочтительности, построенные каждым экспертом группы № 1, согласованы между собой слабее, чем ряды предпочтительности, построенные экспертами группы № 2. Это может объясняться тем, что, несмотря на больший опыт экспертов старшей группы, эксперты младшей группы возможно использовали более современные методы определения облитерирующего атеросклероза сосудов нижних конечностей. И вполне резонно заметить, что у экспертов группы № 1 в процессе работы сформировались собственные убеждения о протекании болезни, тогда как врачи группы № 2 основывались на знаниях, полученных в процессе обучения, не имея достаточного практического опыта.

На основании мнений экспертов групп № 1 и № 2 для определения наиболее важного для ОАСНК фактора риска были составлены таблицы признаков, упорядоченных по важности факторов. В табл. 1 приведен ее фрагмент для группы № 1, состоящий из семи факторов риска ОАСНК, и для сравнения в табл. 2 представлены результаты по группе № 2.

Из данных табл. 1, 2 видно, что наиболее значимым фактором риска возникновения и прогрессирования ОАСНК по группам № 1 и № 2 является повышенное содержание в крови холестерина. Также важно обратить внимание, что само по себе повышение содержания холестерина в крови еще не говорит о том, что диагностируемая болезнь — атеросклероз. Данный показатель требует уточнения с помощью следующих факторов, относящихся к липидному профилю: низкий уровень холестерина липопротеидов высокой плотности (НХЛВП) и повышение концентрации триглицеридов. У экспертов группы № 1 указанные факторы входят в первую шестерку, соответственно занимая позицию 3 и 6. Тогда как в младшей группе № 2 эти же показатели занимают позицию 13 (НХЛВП) и 16 (повышение концентрации триглицеридов).

И в то же самое время в обеих группах среди упорядоченных факторов риска присутствуют такие факторы, как гиперлипидемия, курение сигарет и возраст от 55 до 64 лет. Данный набор факторов риска согласуется с материалами работ [2, 3] и публикациями журнала "Ангиология и сосудистая хирургия" за 2002—2006 года. Так, в работе [3] показано, что наибольший процент больных ОАСНК приходится на возраст от 55 до 64 лет, что составило от общего числа 611 обследованных: 39,8 % для мужчин и 33,7 % для женщин. В работе [3] также показана существенная разница распределения наблюдаемых больных по полу — мужчин было 76 %, женщин 24 %. Это дает основание считать мужской пол фактором риска развития ОАСНК. Избыточный вес как маркер метаболи-

ческих нарушений обнаружен у 48,9 % пациентов, и 40,9 % больных курили и продолжали курить даже при развитии хронического ОАСНК.

Аналогично изложенному выше проведен анализ мнений двух групп экспертов для клинических состояний ОАСНК. Ниже приводятся фрагменты таблиц, где представлено пять критериев оценки состояния больного ОАСНК с результатами опроса группы № 1 (табл. 3) и группы № 2 (табл. 4), показатели отсортированы по убыванию суммы рангов.

Из данных табл. 3, 4 видно, что наиболее значимыми клиническими состояниями ОАСНК по группе № 1 является гангрена стопы или голени, а по группе № 2 — снижение пульсации на магистральных артериях. Причем в группе № 2 критерий гангрена стопы или голени находится на втором месте по значимости, а самый важный показатель, по мнению группы № 2, — это снижение пульсации на магистральных артериях, который

Таблица 3

## Клинические показатели, упорядоченные по важности группой № 1

№	Клинические состояния	Эксперты группы № 1								Σ
		1	2	3	4	5	6	...	18	
		Ранги группы № 1 (18 врачей)								
1	Гангрена стопы или голени	16	16	16	16	16	16	...	16	266
2	Некротические изменения в пальцах стопы	15	12	14	13	14	15	...	15	217
3	Снижение пульсации на магистральных артериях	13	15	14	12	7	14	...	12	215
4	Ишемические отеки голени и стопы	13	7	12	9	13	9	...	11	159
5	Ухудшение реологических свойств крови	10	4	9	9	7	5	...	12	154

Таблица 4

## Клинические показатели, упорядоченные по важности группой № 2

№	Клинические состояния	Сумма рангов для группы № 2 (25 врачей)
1	Снижение пульсации на магистральных артериях	339
2	Гангрена стопы или голени	327
3	Некротические изменения в пальцах стопы	312
4	Ишемические отеки голени и стопы	259
5	"Боли покоя" в горизонтальном положении тела	249

занимает, по мнению группы № 1, лишь позицию 3. Стоит отметить, что первые четыре состояния отмечены главными в обеих группах, что подчеркивает их значимость при диагностировании ОАСНК.

В данном исследовании основная ставка делалась на группу экспертов № 1, и среди факторов риска, как самый важный, был отобран критерий повышения холестерина в крови, который отметили обе группы (табл. 1, 2). Среди клинических показателей отобран критерий появления гангрены стопы или голени (см. табл. 3).

### Корреляционный анализ

При наполнении БД и БЗ интеллектуальной информационной системы поддержки принятия решений "Атеросклероз" необходимо учитывать связи между признаками болезни ОАСНК. Для решения этой задачи в данной работе использовался математический аппарат корреляционного анализа [4]. Рассмотрим реализацию корреляционного анализа обработки статистических данных о влиянии одних признаков заболевания ОАСНК на другие. Для определения зависимости между критериями использовался коэффициент парной корреляции [4].

В работе [5] и, как было показано выше, наиболее значимым фактором риска болезни ОАСНК вы-

брано содержание в крови холестерина, а для клинических состояний в качестве наиболее важного показателя отмечено появление гангрены стопы или голени. В табл. 5 показана зависимость факторов риска от содержания холестерина в крови, в табл. 6 — зависимость клинических состояний от появления гангрены. Данные в табл. 5, 6 отсортированы в порядке убывания значения коэффициента парной корреляции  $r_{xy}$  между наиболее значимыми показателями и всеми остальными соответственно для факторов риска и клинических состояний по болезни ОАСНК.

Необходимо подчеркнуть, что в группе № 1 (табл. 5) важное уточнение показателя увеличения содержания в крови холестерина, такое как НХЛВП, находится на позиции 16 ( $r_{xy} = 0,28$ ). Тогда как в группе № 2 второй уточняющий фактор — повышение концентрации триглицеридов находится на позиции 22 и не зависит от холестерина ( $r_{xy} = -0,09$ ).

В табл. 6 для группы № 1 отмечаются следующие признаки: некротические изменения в пальцах стопы ( $r_{xy} = 0,53$ ); "боли покоя" в горизонтальном положении тела ( $r_{xy} = 0,51$ ); ишемические отеки голени и стопы ( $r_{xy} = 0,36$ ). Обратная зависимость получена для следующих признаков: импотенция ( $r_{xy} = -0,55$ ); варикозное расширение вен нижних конечностей ( $r_{xy} = -0,38$ ); нарушение трофики ( $r_{xy} = -0,33$ ). Для группы № 2

Таблица 5

## Упорядоченная зависимость факторов риска ОАСНК

Анкеты группы экспертов №1			Анкеты группы экспертов № 2		
№	Упорядоченные факторы риска	$r_{xy}$	№	Упорядоченные факторы риска	$r_{xy}$
1	Повышенное содержание в крови холестерина	1	1	Повышенное содержание в крови холестерина	1
2	Ожирение	0,65	2	Ожирение	0,71
3	Повышение концентрации триглицеридов	0,53	3	НХЛВП	0,51
4	Повышенное содержание в крови жиров	0,51	4	Повышенное артериальное давление	-0,39
5	Определенный тип личности	-0,50	5	Частота сердечных сокращений	-0,37
6	Возраст 75 лет и более	-0,50	6	Наследственная предрасположенность	0,35
7	Тромбогенные факторы	0,50	7	Пол (мужской)	-0,33
8	Наследственная предрасположенность	0,40	8	Заболевание печени и почек	0,30
9	Наличие сердечно-сосудистой операции в анамнезе	-0,35	9	Систематическое употребление очень мягкой воды	-0,29
10	Отрицательные эмоции, стресс	-0,34	10	Наличие сердечно-сосудистой операции в анамнезе	-0,29
...	...	...	...	...	...
16	НХЛВП	0,28	22	Повышение концентрации триглицеридов	-0,09

Таблица 6

## Упорядоченная зависимость клинических состояний ОАСНК

Анкеты группы экспертов №1			Анкеты группы экспертов № 2		
№	Упорядоченные клинические состояния ОАСНК	$r_{xy}$	№	Упорядоченные клинические состояния ОАСНК	$r_{xy}$
1	Гангрена стопы или голени	1	1	Гангрена стопы или голени	1,00
2	Импотенция	-0,55	2	Зябкость, тяжесть в голени	-0,49
3	Некротические изменения в пальцах стопы	0,53	3	Снижение температуры	-0,47
4	Боли в покое	0,51	4	Боли при ходьбе после 1 км	0,41
5	Варикозное расширение вен	-0,38	5	Боли (после 200 м)	0,34
6	Нарушение трофики	-0,37	6	Ухудшение реологических свойств крови	0,31
7	Ишемические отеки голени и стопы	0,36	7	Побледнение конечностей в горизонтальном положении	0,26
8	Боли (после 200 м)	-0,35	8	Варикозное расширение вен нижних конечностей	-0,23
9	Боли при ходьбе менее 200 м	0,16	9	Нарушение трофики	-0,19
10	Зябкость, тяжесть в голени	0,16	10	Снижение лодыжечно-плечевого индекса	-0,18
11	Снижение пульсации на магистральных артериях	-0,14	11	Снижение пульсации на магистральных артериях	-0,13
12	Снижение лодыжечно-плечевого индекса	0,11	12	Боли при ходьбе менее 200 м	0,12
13	Снижение температуры на конечностях	0,11	13	Некротические изменения в пальцах стопы	-0,08
14	Побледнение конечностей в горизонтальном положении	-0,10	14	Импотенция	-0,07
15	Боли (после 1 км)	0,10	15	Боли в покое	0,04
16	Ухудшение реологических свойств крови	0,07	16	Ишемические отеки голени и стопы	-0,02

стоит отметить следующие признаки: боли при ходьбе после 1 км ( $r_{xy} = 0,41$ ); боли при ходьбе после 200 м ( $r_{xy} = 0,34$ ); ухудшение реологических свойств крови ( $r_{xy} = 0,31$ ). Обратная зависимость получена для следующих признаков: повышенное артериальное давление ( $r_{xy} = -0,39$ ); частота сердечных сокращений ( $r_{xy} = -0,37$ ); мужской пол ( $r_{xy} = -0,33$ ).

Главной особенностью поражения атеросклерозом артерий нижних конечностей является неуклонно прогрессирующее течение заболевания, характеризующееся нарастанием выраженности перемежающейся хромоты и переходом ее в постоянный болевой синдром или гангрену. Согласно классификациям R. Fontaine — A. В. Покровского [3] и В. С. Савельева и В. М. Кошкина [2] — хроническая недостаточность кровообращения нижних конечностей (НК) вследствие облитерирующего атеросклероза аорты и их артерий подразделяется на четыре стадии: стадия 1 — полная компенсация или доклиническая стадия; стадия 2 или 2А — латентная стадия; стадия 2Б — период неспецифических проявлений; стадия 3 или 3А — период хронической артериальной окклюзии и субкритической ишемии; стадия 3Б — проявление критической ишемии; стадия 4 или 4А — язвенно-некротические изменения конечности; стадия 4Б — развитие гангрены стопы или голени.

Поскольку при постановке диагноза ОАСНК задача врача-хирурга заключается в определении стадии ОАСНК, которая характеризует степень артериальной недостаточности, то данные табл. 6 были рассмотрены в соответствии с этими стадиями [2, 3, 6].

Для клинических состояний в табл. 6 были представлены соответствующие стадии ОАСНК [2, 3]. Затем были отсортированы по возрастанию коэффициенты парной корреляции  $r_{xy}$  между клиническими состояниями и появлением гангрены стопы, тем самым, получили следующую картину расстановки стадии ОАСНК в зависимости от мнений экспертов каждой группы (табл. 7).

Таблица 7

## Согласованность клинических состояний со стадиями ОАСНК

Анкеты группы экспертов №1				Анкеты группы экспертов № 2			
№	Стадии ОАСНК	Упорядоченные клинические состояния ОАСНК	$r_{xy}$	№	Стадии ОАСНК	Упорядоченные клинические состояния ОАСНК	$r_{xy}$
1	2А	Боли при ходьбе после 200 м	-0,35	1	1	Зябкость, тяжесть в голени	-0,49
2	1	Боли (после 1 км)	0,1	2	1	Снижение температуры НК	-0,47
3	1	Снижение температуры НК	0,11	3	4А	Некротические изменения в пальцах	-0,08
4	1	Зябкость, тяжесть в голени	0,16	4	3Б	Ишемические отеки голени и стопы	-0,02
5	2Б	Боли при ходьбе менее 200 м	0,16	5	3А	Боли в покое	0,04
6	3Б	Ишемические отеки голени и стопы	0,36	6	2Б	Боли при ходьбе менее 200 м	0,12
7	3А	Боли в покое	0,51	7	2А	Боли (после 200 м)	0,34
8	4А	Некротические изменения в пальцах	0,53	8	1	Боли (после 1 км)	0,41
9	4Б	Гангрена на нижних конечностях	1	9	4Б	Гангрена на нижних конечностях	1

Из табл. 7 видно, что результаты опроса по группе № 1 практически соответствуют классификации ОАСНК по стадиям артериальной недостаточности, а по группе экспертов № 2 картина иная.

### Регрессионный анализ

В исследовании диагностирования ОАСНК использовались следующие уравнения регрессионного анализа по результатам анкетирования экспертов (табл. 8).

Все расчеты проводились с использованием пакета прикладных программ "Statistica 7.0". Для заполнения БЗ ИИСППРВ в группе № 1 и группе № 2 [6] были отобраны те факторы риска, коэффициенты парных корреляций которых значимы на уровне 0,05 (табл. 9, 10).

Для анализа результатов анкетирования группы № 1 примем следующие обозначения:  $Y_{1,1}(X)$  — уровень холестерина в крови;  $x_1$  — ожирение;  $x_2$  — концентрация триглицеридов;  $x_3$  — гиперлипидемия;  $x_4$  — тромбогенные факторы.

В результате расчетов получено следующее уравнение регрессии:

$$Y_{1,1}(X) = -0,272(\pm 5,183) + 0,616(\pm 0,242)x_1 + 0,379(\pm 0,213)x_2 - 0,045(\pm 0,190)x_3 + 0,136(\pm 0,151)x_4. \quad (1)$$

В уравнении (1) наибольший вклад в функцию отклика  $Y_{1,1}(X)$  с уровнем значимости  $p < 0,05$  вносит ожирение. Отбрасывая незначимые эффекты, получаем

$$Y_{1,1,1}(X) = -0,225(\pm 4,977) + 0,712(\pm 0,202)x_1 + 0,449(\pm 0,173)x_2. \quad (1^*)$$

Так как все эффекты статистически значимые, модель признается окончательной, и значения коэффициентов регрессии уравнения (1\*) заносятся в БЗ ИИСППРВ "Атеросклероз".

Анализ уравнений регрессии второго порядка [5, 6] для моделей (2), (3), (4), (6) показал, что их статистические эффекты ( $p > 0,05$ ) не значимы, в данной статье указанные модели не приводятся [5, 6].

По результатам анализа анкетирования группы № 2, применяя следующие обозначения:  $Y_{2,1}$  — уровень холестерина в крови,  $x_1$  — ожирение,  $x_2$  — НХЛВП, получена следующая модель:

$$Y_{2,1}(X) = 10,712(\pm 2,95) + 0,489(\pm 0,115)x_1 - 0,175(\pm 0,079)x_2. \quad (5)$$

В уравнении (5) наибольший вклад в функцию отклика  $Y_{2,1}(X)$  вносит ожирение ( $p = 0,001$ ) и НХЛВП ( $p = 0,039$ ).

Модель, учитывающая линейные эффекты, квадратичные эффекты и эффекты взаимодействия факторов, имеет вид:

$$Y_{2,3}(X) = 18,184(\pm 6,676) - 1,131(\pm 0,691)x_1 - 0,051(\pm 0,018)x_1^2 + 1,307(\pm 0,699)x_2 + 0,011(\pm 0,009)x_2^2 - 0,054(\pm 0,021)x_1x_2. \quad (7)$$

В уравнении (7) наибольший статистически значимый вклад в функцию отклика  $Y_{2,3}(X)$  вносит квадратичный эффект  $x_1^2 = 0,051$  (ожирение,  $p = 0,01$ ) и взаимное влияние двух факторов  $x_1x_2 = -0,054$  (ожирение и НХЛВП,  $p = 0,02$ ). Остальные эффекты статистически не значимы. Далее, исключая квадратичные эффекты, получа-

Таблица 8

Модели регрессионного анализа

Группа экспертов	Уравнение	Модель	Эффекты и факторы, учитываемые моделью
№ 1	$Y_{1,1}(X)$	(1)	Линейные эффекты
№ 1	$Y_{1,2}(X)$	(2)	Квадратичные эффекты
№ 1	$Y_{1,3}(X)$	(3)	Эффекты взаимодействия факторов
№ 1	$Y_{1,4}(X)$	(4)	Линейные, квадратичные и эффекты взаимодействия факторов
№ 2	$Y_{2,1}(X)$	(5)	Линейные эффекты
№ 2	$Y_{2,2}(X)$	(6)	Квадратичные эффекты
№ 2	$Y_{2,3}(X)$	(7)	Эффекты взаимодействия факторов
№ 2	$Y_{2,4}(X)$	(8)	Линейные, квадратичные и эффекты взаимодействия факторов

Таблица 9

Факторы риска болезни ОАСНК по группе № 1

№ фактора	Результаты анализа анкет группы № 1 (18 экспертов)	$r_{xy}$	Значимость $p < 0,05$
1	Уровень холестерина в крови	1	—
2	Ожирение (избыточное, высококалорийное питание)	0,65	0,003
3	Повышение концентрации триглицеридов	0,53	0,024
4	Гиперлипидемия	0,51	0,031
4	Тромбогенные факторы	0,50	0,035

Таблица 10

Факторы риска болезни ОАСНК по группе № 2

№ фактора	Результаты анализа анкет группы № 2 (18 экспертов)	$r_{xy}$	Значимость $p < 0,05$
1	Уровень холестерина в крови	1	—
2	Ожирение (избыточное, высококалорийное питание)	0,71	0,000
2	Низкий уровень холестерина липопротеидов высокой плотности (НХЛВП)	0,51	0,009

Дисперсионный анализ и проверка адекватности наилучших моделей

Модель	$R$	$R^2$	$R^*$	Значение $F$ -критерия	Значимость модели	$K$	Значимость эффектов $p < 0,05$
1	0,79	0,63	0,51	$F(4,13) = 5,52$	0,008	4	$x_1 = 0,616, p = 0,02$
1*	0,78	0,60	0,55	$F(2,15) = 11,45$	0,001	2	Все значимы!
2	0,8	0,64	0,54	$F(4,13) = 5,93$	0,006	2	Все не значимы
3	0,8	0,65	0,5	$F(5,12) = 4,45$	0,01	2	—"
4	0,77	0,6	0,51	$F(3,14) = 7,129$	0,003	2	—"
5	0,77	0,59	0,56	$F(2,22) = 16,15$	0,00005	2	Все значимы!
6	0,80	0,64	0,58	$F(4,20) = 9,17$	0,0002	2	Все не значимы
7	0,86	0,73	0,66	$F(5,19) = 10,49$	0,0001	2	$x_1^2 = 0,05, p = 0,01$ $x_1x_2 = -0,05$ $p = 0,02$
8	0,78	0,6	0,55	$F(3,21) = 10,81$	0,0001	2	$x_1 = 0,659, p = 0,01$

1\* — уточненная модель 1,  $R$  — коэффициент множественной корреляции;  $R^2$  — коэффициент детерминации;  $R^*$  — скорректированный  $R$ ;  $K$  — число независимых переменных;  $x_1$  — ожирение;  $x_2$  — низкий уровень холестерина липопротеидов высокой плотности.

ем модель, учитывающую линейные эффекты и эффекты взаимодействия факторов:

$$Y_{2,4}(X) = 6,295(\pm 6,227) + 0,659(\pm 0,24)x_1 + 0,59(\pm 0,527)x_2 - 0,015(\pm 0,019)x_1x_2. \quad (8)$$

В данном уравнении статистически значимый эффект имеется только для  $x_1 = 0,659$  (ожирение,  $p = 0,01$ ), модель (8) не принимается.

Результаты дисперсионного анализа, данные по адекватности и значимости наилучших возможных моделей 1—4 для группы экспертов № 1 и моделей 5—8 для группы экспертов № 2 сведены в табл. 11.

### Выводы

1. В результате экспертного анализа составлен перечень признаков, оказывающих наибольшее влияние на постановку диагноза. К ним прежде всего относятся факторы риска и клинические состояния ОАСНК.

2. С использованием метода ранговой корреляции в качестве зависимой переменной для факторов риска двумя группами экспертов было выбрано повышение в крови большого содержания холестерина. Для клинических состояний группа № 1 выбрала развитие гангрены стопы или голени, группа № 2 — снижение пульсации на магистральных артериях.

3. Корреляционный анализ факторов риска и клинических состояний ОАСНК позволил впервые количественно оценить связь признаков, влияющих на постановку диагноза ОАСНК. Получена количественная оценка зависимости 32 факторов риска ОАСНК от повышения содержания в крови холестерина и 16 клинических состояний от появления гангрены стопы или голени.

4. В результате регрессионного анализа статистических данных оказалось, что наиболее значимыми факторами риска ОАСНК являются: ожирение, избыточное высококалорийное питание; концентрация триглицеридов и низкие уровни холестерина ли-

попротеидов высокой плотности (НХЛВП). Причем НХЛВП является составляющим показателем уровня холестерина в крови, а концентрация триглицеридов обязательным критерием диагностики ОАСНК, что согласуется с работами [2, 3].

5. Таким образом, проведенное статистическое исследование не противоречит данным, приведенным в медицинской литературе, а полученные и занесенные в базу знаний математические модели с последующим корреляционно-регрессионным анализом истории болезни помогут врачу с помощью ИССППРВ не только объективно диагностировать заболевание ОАСНК, но и обоснованно предсказывать вероятность его возникновения, своеобразии развития и исхода.

### Список литературы

1. Федоров Д. А., Федин А. С. К методике анализа предметной области в медицинских интеллектуальных информационных системах // Сб. тр. Второй международной научно-практической конференции "Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности" 07—09.01.2006, Санкт-Петербург, Россия / Под ред. А. П. Кудинова, Г. Г. Матвиенко, В. Ф. Самохина. СПб.: Изд. Политех. ун., 2007. Т. 5. С. 189—190.
2. Савельев В. С., Кошкин В. М., Кунижев А. С. Критическая ишемия как следствие неадекватного лечения больных хроническими облитерирующими заболеваниями артерий нижних конечностей на амбулаторном этапе // Ангиология и сосудистая хирургия. 2004. Т. 10. С. 7—10.
3. Горбачев В. В., Мрочек А. Г. Атеросклероз: учебное пособие. Минск: Книжный Дом, 2005. 608 с.
4. Острейковский В. А. Теория систем. М.: Высш. шк., 1997. 240 с.
5. Федоров Д. А., Острейковский В. А. Корреляционный анализ признаков заболевания при постановке диагноза облитерирующего атеросклероза артерий нижних конечностей с использованием интеллектуальной информационной системы поддержки принятия решений врача-хирурга "Атеросклероз" // Надежность и качество: труды Международного симпозиума: в 2-х т / Под ред. Н. К. Юркова. Пенза: ИИЦ ПензГУ. 2008. Т. 2. С. 211—217.
6. Федоров Д. А., Острейковский В. А. Фрагмент базы знаний интеллектуальной информационной системы "Атеросклероз" поддержки принятия решений врача-хирурга с использованием методов регрессионного анализа // Инновации в условиях развития информационно-коммуникационных технологий: Материалы научно-практической конф. / Под ред. В. Г. Домрачева, С. У. Увайсова. М.: МИЭМ, 2008. С. 455—459.

**М. С. Токмачев**, канд. физ.-мат. наук, проф.,  
Новгородский государственный университет  
им. Ярослава Мудрого,  
e-mail: tokm@mail.natm.ru,

**П. П. Рязанцев**, зам. директора  
по информатизации,  
Государственное учреждение здравоохранения  
"Медицинский информационно-аналитический  
центр", г. Великий Новгород,  
e-mail: searchnow@list.ru

## **Формирование персонафицированной базы данных и программная реализация исследования здоровья населения региона**

*Сформирована персонафицированная база данных заболеваемости и смертности населения Новгородской области. На основе МКБ-10 и полученной базы данных разработана классификация состояний здоровья и создан программный комплекс, численно реализующий авторскую методику исследования здоровья населения. Приведены некоторые численные результаты.*

**Ключевые слова:** персонафицированная база данных (ПБД), программный комплекс, цепь Маркова, состояние здоровья, Международная классификация болезней (МКБ-10), иерархия классов, стохастическая матрица, вероятность, прогноз

### **Введение**

В условиях быстрого развития и внедрения информационных технологий в различные отрасли появилась возможность проводить статистический анализ в тех областях знаний, в которых ранее он либо не представлялся возможным, либо был чрезмерно трудоемким. Такой недостаточно изученной и в то же время обладающей колоссальными массивами статистических данных является система охраны здоровья населения. Применение к этим массивам новых информационных технологий позволяет извлекать и более полно и качественно использовать в здравоохранении ценнейшую разностороннюю информацию о состоянии и перспективах общественного здоровья.

Методика, согласно которой получены соответствующие алгоритмы, использует авторские материалы [1—4], вероятностно-статистические методы и базируется на применении неоднородных цепей Маркова. Для численной реализации методики исследования здоровья населения с использованием новых показателей разработаны алгоритмы класси-

фикации состояний здоровья, сформирована персонафицированная база данных и на ее основе создан программный комплекс, осуществляющий основную, наиболее громоздкую часть вычислений. Результаты исследования позволяют оценить в динамике текущее состояние здоровья населения (по половозрастным группам, по классам болезней, по тяжести, по смертности, по перспективам), осуществить вероятностный прогноз, провести моделирование процесса общественного и индивидуального здоровья с количественной оценкой возможных путей его развития.

### **Классификация состояний и формирование новой базы данных**

Статистические данные, призванные наполнить теоретические исследования реальным содержанием, получены путем совмещения персонафицированных баз данных (ПБД) социальных показателей населения Новгородской области:

- ПБД территориального фонда обязательного медицинского страхования "Регистр застрахованного населения";
- ПБД территориального фонда обязательного медицинского страхования "Реестр пролеченного населения";
- ПБД государственного учреждения здравоохранения "Медицинский информационно-аналитический центр" "Регистр умершего населения".

Для работы с данными, изменяющимися во времени, необходима именно персонафицированная, единая БД и четко работающие алгоритмы идентификации объектов. Обработка составных частей Единой БД "Здоровье населения региона" (рис. 1) проводится по следующим параметрам: пол; возрастная категория; начальное состояние здоровья; конечное состояние здоровья; смертность.

Классификация состояний здоровья индивидуума при наличии значимых заболеваний как на начальном, так и на конечном этапе наблюдения осуществляется по доминирующему заболеванию согласно кодировке Международной классификации болезней (МКБ-10) и степени тяжести, определяемой для всех имеющихся заболеваний (табл. 1, состояния  $E_1, E_2, \dots, E_{19}$ ).

Для однозначного выбора состояния  $E_j$  при наличии у индивидуума заболеваний разных классов, но одинаковой степени тяжести, вводится иерархия классов. Иерархия классов — упорядочивание классов болезней в соответствии с реальными данными уровней смертности населения по причине болезни из соответствующего класса. Чем больше уровень



Рис. 1. Структура исходных статистических данных

Таблица 1

Классификация состояний здоровья по кодировке МКБ-10

Состояние	Класс	
$E_0$	—	"Относительно здоров"
$E_1$	I00—I99	Болезни системы кровообращения
$E_2$	S00—T98	Травмы, отравления и некоторые другие последствия воздействия внешних причин
$E_3$	C00—D48	Новообразования
$E_4$	J00—J99	Болезни органов дыхания
$E_5$	R00—R99	Симптомы, признаки и отклонения от нормы, выявленные при клинических и лабораторных исследованиях, не классифицированные в других рубриках
$E_6$	K00—K93	Болезни органов пищеварения
$E_7$	A00—B99	Некоторые инфекционные и протозойные болезни
$E_8$	G00—G99	Болезни нервной системы
$E_9$	N00—N99	Болезни мочеполовой системы
$E_{10}$	F00—F99	Психические расстройства и расстройства поведения
$E_{11}$	D50—D89	Болезни крови, кроветворных органов и отдельные нарушения, вовлекающие иммунный механизм
$E_{12}$	E00—E90	Болезни эндокринной системы, расстройства питания и нарушения обмена веществ
$E_{13}$	M00—M99	Болезни костно-мышечной системы и соединительной ткани
$E_{14}$	Q00—Q99	Врожденные аномалии (пороки развития), деформации и хромосомные нарушения
$E_{15}$	L00—L99	Болезни кожи и подкожной клетчатки
$E_{16}$	O00—O99	Беременность, роды и послеродовой период
$E_{17}$	P00—P96	Отдельные состояния, возникающие в перинатальном периоде
$E_{18}$	H60—H95	Болезни уха и сосцевидного отростка
$E_{19}$	H00—H59	Болезни глаза и его придаточного аппарата
$E_{20}$	—	"Смерть"

смертности в классе болезней, тем выше его место в данной классификации. Таким образом, на первом месте в иерархии классов оказываются "болезни системы кровообращения" (состояние  $E_1$ ), далее следуют "травмы, отравления..." (состояние  $E_2$ ) и т. д. Отметим, что по данным государственной статистики в среднем на одного жителя области приходится около двух заболеваний, поэтому для однозначной констатации состояния является необходимым введение доминирующего заболевания и иерархии классов. Вместе с тем, введение в рассмотрение сочетаний болезней как отдельного состояния является нецелесообразным ввиду резкого усложнения системы и недостаточного количества наблюдений в отдельных состояниях, что неминуемо приведет к ухудшению точности расчетов и повлияет на достоверность выводов.

Для определения начального состояния за основу взят регистр застрахованных, в котором выделено "живое" население Новгородской области на начало 2000 года. Индикатор того, что человек жив на конкретную дату, рассчитывали исходя из даты рождения и статуса страхового полиса, а также даты окончания действия страхового полиса. Далее у этих людей были отслежены заболевания, по поводу которых они обращались в течение 2000 года, и по иерархии состояний здоровья определялось состояние каждого индивидуума на начальный момент времени, за который принято 01.01.2001. Умершие за период 2000 г. (по данным регистра умершего населения) из исследования исключались. Упрощенная схема формирования состояния здоровья представлена на рис. 2.

**Иерархия для определения начального состояния индивидуума:**

**Шаг 1.** Контрольное условие — на 01.01.2001 индивидуум жив.



Рис. 2. Схема для формирования состояний здоровья

**Шаг 2.** Выборка всех заболеваний за 2000 год.

**Шаг 3.** Определение степеней тяжести для всех имеющихся заболеваний (1 — наиболее тяжелое, 2 — средней тяжести, 3 — малой тяжести).

**Шаг 4.** Выбор среди отмеченных наиболее тяжелых заболеваний.

**Шаг 5.** Определение тяжести классов болезней (иерархия классов).

**Шаг 6.** Выбор заболевания с наиболее тяжелым классом.

**Шаг 7.** Присвоение индивидууму начального состояния.

Для определения конечного состояния тех же индивидуумов использовался похожий алгоритм, учитывающий реестры пролеченного населения с 2001 по 2005 г. включительно и регистр умершего населения за тот же период. Конечное состояние определялось на 01.01.2006 г. Исследование данных за весь пятилетний интервал продиктовано объективными причинами: во-первых, смертностью населения в течение всего периода наблюдений; во-вторых, контролем за тяжелыми, хроническими формами заболеваний, записи о которых могли и отсутствовать за последний год наблюдений (это технические проблемы, вызванные исследованием заболеваемости по обращаемости). Если конкретный индивидуум за рассматриваемый пятилетний интервал выбыл из наблюдения, например переехал в другую местность (данные страховой кампании), то он исключается из исследования, так как наблюдение оказывается неполным.

**Иерархия для определения конечного состояния индивидуума:**

**Шаг 1.** Выборка всех заболеваний за 2001—2005 годы.

**Шаг 2.** Идентификация умерших по фамилии, имени, отчеству и дате рождения в соответствии

с регистром умершего населения (формирование группы индивидуумов с конечным состоянием  $E_{20}$  — "смерть").

**Шаг 3.** Если индивидуум за период 2001—2005 г. не найден в регистре умершего населения, для него проводится классификация по алгоритму:

**Шаг 3.1.** Определение степеней тяжести для всех заболеваний (1 — наиболее тяжелое, 2 — средней тяжести, 3 — малой тяжести).

**Шаг 3.2.** Выбор наиболее тяжелых заболеваний.

**Шаг 3.3.** Определение тяжести классов заболеваний в соответствии с иерархией классов.

**Шаг 3.4.** Выбор заболевания с наиболее тяжелым классом.

**Шаг 3.5.** Присвоение индивидууму конечного состояния из группы состояний  $E_1, E_2, \dots, E_{19}$ , связанных с заболеваемостью.

**Шаг 4.** При отсутствии тяжелых заболеваний индивидууму присваивается состояние  $E_0$  — "относительно здоров".

Отметим, что вопросы тяжести того или иного заболевания, а также введенной иерархии классов несут некоторую долю субъективности исследователей. Для решения возможных проблем алгоритмизации исследования и разбора конкретных случаев с неоднозначной трактовкой в качестве экспертов были привлечены специалисты в сфере медицины и здравоохранения: ученые, практикующие врачи различных специализаций, специалисты страховой компании (врачи, статистики и программисты). В результате в компьютерную программу внесены некоторые контрольные ограничения и коррективы, минимизирующие ошибки регистрации, опечатки при вводе статистических данных. В итоге получен *однозначный, полностью компьютеризированный алгоритм классификации по состояниям*.

Таким образом, из исходных ПБД получается одна БД, в которой для каждого индивидуума кроме пола и возраста зафиксированы начальное и конечное состояния. Отметим особенности данной реализации:

- использована ПБД за временной интервал 2000—2005 гг.;
- сформированная новая БД содержит данные практически всего наличного населения области на 01.01.2001 г. (порядка 700 тыс. чел.) за исключением лиц, мигрировавших из области в последующие годы;
- состояние  $E_0$  — "относительно здоров" — включает в себя не только здоровых, но и всех не обращавшихся за медицинской помощью;

- при наличии нескольких заболеваний, принадлежащих к разным классам, классификация состояния осуществляется по доминирующему заболеванию, в соответствии со степенью тяжести заболевания и установленной иерархией классов;
- состояние  $E_{20}$  — "смерть" — не зависит от причины смерти.

### Разработка программного комплекса

Исходной базой для расчетов показателей здоровья населения являются стохастические матрицы, которые формируются для каждого пятилетнего возрастного интервала (шаг процесса) отдельно для мужского и женского населения. Элементами стохастических матриц служат вероятности переходов из каждого состояния здоровья  $E_i$  в любое другое состояние  $E_j$  (в частности, может оказаться  $i = j$ ) за пятилетний период. Стохастические матрицы получаются из созданной базы данных путем подсчета числа имеющихся комбинаций переходов в соответствии со статистическим определением вероятности. Используя математический аппарат цепей Маркова и соответствующие авторские разработки [1—3], можно вычислить ряд показателей здоровья населения в зависимости не только от пола и возраста (что является стандартной задачей), но и от текущего состояния здоровья в соответствии с введенной классификацией. Методика и созданный программный комплекс позволяют находить значения и некоторых нестандартных показателей.

Перечислим конкретные процедуры, осуществляемые программным комплексом.

1. Вычисление матрицы безусловных вероятностей (вероятностный прогноз на произвольное число шагов) для индивидуума, находящегося в любом возрастном интервале с определенным состоянием здоровья.

2. Вычисление безусловных вероятностей (вероятностный прогноз на произвольный период времени) для индивидуума в любом возрасте с определенным состоянием здоровья. Используется метод линейной интерполяции.

3. Вычисление матрицы безусловных вероятностей (вероятностный прогноз) для группы индивидуумов одного возраста и различными состояниями здоровья. По сути, найденный прогноз является многомерным показателем текущего здоровья в группе.

4. Построение законов распределения определенного типа для случайных величин, характеризующих количество лет жизни индивидуума, дожившего до  $i$ -го возрастного интервала и находящегося в состоянии  $E_j$ .

5. Нахождение числовых характеристик распределения времен жизни.

6. Построение матрицы средней ожидаемой продолжительности жизни у индивидуумов, находящихся в настоящее время в  $i$ -м возрастном интервале в состоянии здоровья  $E_j$ .

7. Прогнозирование средней продолжительности жизни поколения в зависимости от пола, начального возраста и состояния здоровья.

7.1. Расчет матрицы средней продолжительности жизни.

8. Прогнозирование средней продолжительности жизни фактического населения по группам (пол, возраст, состояние здоровья).

8.1. Расчет матрицы числа лет оставшейся жизни.

9. Построение показателей, характеризующих состояния здоровья.

9.1. Расчет матрицы потерь.

9.2. Расчет индексной матрицы (индексы потерь).

9.3. Расчет базисных и цепных приростов средней продолжительности жизни (влияние возраста на степень тяжести состояния здоровья); расчет соответствующих относительных показателей.

9.4. Расчет матрицы дожития (индексы дожития).

9.5. Расчет матрицы недожития (индексы недожития).

В частности, на рис. 3 (см. вторую сторону обложки) представлена графическая иллюстрация распределения безусловных вероятностей, вычисленных для "поколения 0 лет" (женщины) в пересчете на 10 тыс. населения. По оси абсцисс располагаются возрастные интервалы (указаны их середины), а по оси ординат — количественные данные заболеваемости и смертности в разложении по состояниям  $E_0, E_1, \dots, E_{20}$ . Граница между последним из состояний заболеваемости  $E_{19}$  и состоянием  $E_{20}$  (смерть), по сути, для данного поколения является кривой выживаемости. Такого рода "спектральное разложение" служит основой для более глубокого изучения общественного здоровья.

Изменение численных статистических соотношений между состояниями здоровья населения соответствует изменению заданных переходных вероятностей. Поэтому для исследовательских целей предусмотрена процедура замены значений переходных вероятностей в стохастических матрицах. Дальнейший программный расчет показателей выявляет, к каким конкретным последствиям это ведет. Например, снижение смертности мужского населения в трудоспособных возрастах на 5 % приводит к увеличению показателя средней продолжительности жизни (СПЖ) от 2,28 до 2,54 лет, а на 10 % — от 4,27 до 4,73 лет (подробнее по состояниям см. табл. 2). Аналогичные приросты для женского населения представлены в табл. 3.

Таким образом, методика и, как следствие, разработанный программный комплекс предоставляют возможность моделирования человеческой жизни в плане здоровья в зависимости от реаль-

Таблица 2

Прирост показателя СПЖ мужского населения в "поколении 0 лет" при снижении смертности в трудоспособных возрастах на 5 и 10 %

Состояние	$E_0$	$E_1$	$E_2$	$E_3$	$E_4$	$E_5$	$E_6$	$E_7$	$E_8$	$E_9$	$E_{10}$	$E_{11}$	$E_{12}$	$E_{13}$	$E_{14}$	$E_{15}$	$E_{16}$	$E_{17}$	$E_{18}$	$E_{19}$
5 %, прирост	2,38	2,28	2,33	2,32	2,34	2,28	2,29	2,28	2,38	2,28	2,34	2,29	2,53	2,28	2,54	2,32	—	2,43	2,30	2,28
10 %, прирост	4,45	4,27	4,36	4,34	4,37	4,27	4,29	4,27	4,46	4,28	4,38	4,28	4,72	4,27	4,73	4,34	—	4,53	4,32	4,27

Таблица 3

Прирост показателя СПЖ женского населения в "поколении 0 лет" при снижении смертности в трудоспособных возрастах на 5 и 10 %

Состояние	$E_0$	$E_1$	$E_2$	$E_3$	$E_4$	$E_5$	$E_6$	$E_7$	$E_8$	$E_9$	$E_{10}$	$E_{11}$	$E_{12}$	$E_{13}$	$E_{14}$	$E_{15}$	$E_{16}$	$E_{17}$	$E_{18}$	$E_{19}$
5 %, прирост	1,11	1,08	1,04	1,31	1,08	1,09	1,08	1,31	1,21	1,04	1,03	1,31	1,04	1,14	1,29	1,12	—	1,18	1,05	1,16
10 %, прирост	2,08	2,02	1,94	2,42	2,00	2,03	2,01	2,42	2,23	1,94	1,93	2,43	1,94	2,10	2,38	2,09	—	2,18	1,96	2,16

ной либо гипотетической ситуации и тем самым существенно расширяют потенциал исследования. Предусмотренная функция моделирования процесса здоровья позволяет просчитывать варианты прогноза на ближайшую и отдаленную перспективу по различным сценариям. Тем самым закладывается возможность согласно исследованию вносить в дальнейший процесс охраны здоровья населения элементы управления с просчитываемыми результатами.

Наборы значений показателей, связанных с заболеваемостью и смертностью населения, служат основой дальнейшего исследования временных рядов, представляющих модель поколения с точки зрения здоровья, предполагают построение регрессионных соотношений зависимостей типа "факторы—отклик", а также открывают новые перспективы исследования здоровья населения специалистами-медиками.

### Заключение

В созданном программном комплексе реализована нестандартная теоретическая методика оценки здоровья населения региона (с численными данными по Новгородской области), предоставляющая широкие возможности для исследовательской работы. Использование *персонафицированной* БД привносит определенные сложности в сам процесс исследования, однако это с лихвой компенсируется полученными результатами.

Достоинством реализованной методики оценки здоровья населения является исследование данных в динамике, что затрагивает внутренние структурные связи процесса. Выявленные и учтенные тенденции позволяют сделать следующий шаг — перейти к прогнозированию. Вычисляемые безусловные вероятности, по существу, и являются вероят-

ностным прогнозом заболеваемости и смертности населения в зависимости от начальных данных (пол, возраст, состояние здоровья согласно классификации) на весь последующий период жизни. Как относиться к таким прогнозам, особенно на долгосрочную перспективу, каждый исследователь вправе решать самостоятельно. Однако в любом случае прогнозируемые показатели служат комплексной характеристикой современного состояния общественного здоровья и системы здравоохранения, а разработанный программный комплекс такие характеристики предоставляет.

В программе предусмотрена возможность прогноза и при изменяющихся условиях, и соответствующих вероятностях, что придает программному комплексу и использованной методике в целом определенную завершенность. Результаты исследования согласуются с данными медицинских учреждений и востребованы в региональных органах здравоохранения как способствующие принятию управленческих решений.

Ввиду использования МКБ-10 с кодами заболеваний и четкой алгоритмизации процесса, методика исследования воспроизводима и в других регионах.

### Список литературы

1. Токмачев М. С. Цепи Маркова в прогнозировании medico-социальных показателей // Обозрение прикладной и промышленной математики. 2003. Т. 10. Вып. 2. С. 517—518.
2. Токмачев М. С. Разработка ряда показателей общественного здоровья на основе цепей Маркова // Вестник НовГУ. Приложение. Серия: Техн. науки. 2004. № 28. Препринт. С. 3—7.
3. Токмачев М. С. Разработка новых показателей общественного здоровья на основе статистических данных // Сб. науч. тр. Новгородского научного центра Северо-Западного отделения РАМН. М.: Медицина, 2005. Т. С. 119—127.
4. Медик В. А., Токмачев М. С. Математическая статистика в медицине: учеб. пособие М.: Финансы и статистика, 2007. 800 с.

УДК 519.63+ 550.837.211

**П. А. Домников**, аспирант,  
Новосибирский государственный  
технический университет,  
e-mail: p\_domnikov@mail.ru

## Распараллеливание задач конечно-элементного моделирования трехмерных магнитотеллурических полей

*Рассматривается подход к распараллеливанию задач моделирования трехмерных магнитотеллурических полей по частотам. Приводятся математические постановки, ориентированные на узловую и векторный методы конечных элементов с выделением одномерной части поля. Проведен вычислительный эксперимент по распараллеливанию конкретной задачи магнитотеллурического зондирования. Предлагаемый подход к распараллеливанию может быть успешно применен для решения трехмерных задач магнитотеллурического зондирования в локальной сети компьютеров.*

**Ключевые слова:** метод конечных элементов, метод магнитотеллурического зондирования, параллельное программирование

### Введение

Метод магнитотеллурического зондирования (МТЗ) — один из методов поиска и разведки полезных ископаемых, а также изучения электропроводности земной коры. Источником поля в МТЗ является естественное электромагнитное поле Земли (магнитотеллурическое поле) [1]. Методика МТЗ сводится к длительным регистрациям на полевых пунктах компонент электрического ( $E_x$ ,  $E_y$ ) и магнитного ( $H_x$ ,  $H_y$ ) полей. Затем строятся кривые МТЗ — зависимости кажущегося сопротивления  $\rho_{xy} = |Z_{xy}|^2 / \mu_0 \omega$ ,  $\rho_{yx} = |Z_{yx}|^2 / \mu_0 \omega$  и фазы импеданса  $\varphi_{xy} = \arg(Z_{xy})$ ,  $\varphi_{yx} = \arg(Z_{yx})$  от величины  $\sqrt{T}$ , где  $T$  — период. Здесь  $\mu_0$  — магнитная проницаемость вакуума,  $\omega$  — циклическая частота поля, компоненты импеданса  $Z$  определяются соотношениями  $E_x = Z_{xx}H_x + Z_{xy}H_y$ ,  $E_y = Z_{yx}H_x + Z_{yy}H_y$ .

Задача интерпретатора-геофизика, работающего с кривыми МТЗ, состоит в том, чтобы путем многократной корректировки геоэлектрической

модели добиться наилучшего совпадения экспериментальных и теоретических кривых. На каждом этапе корректировки в модель вносятся изменения и решается прямая задача моделирования электромагнитного поля. Таким образом, геофизикам необходимо программное обеспечение, осуществляющее расчеты трехмерных гармонических по времени электромагнитных полей в сложносоставных средах.

Следует обратить внимание, что время проведения работ, направленных на восстановление геоэлектрического разреза, напрямую зависит от времени расчета прямой задачи. Использование современных методов вычислительной математики и их параллельная реализация необходимы для эффективного решения задачи ускорения проведения таких расчетов.

### Математические модели

Чаще всего используются геоэлектрические модели, состоящие из горизонтально-слоистой вмещающей среды и трехмерных неоднородностей в форме прямоугольных параллелепипедов, различающихся электрической проводимостью  $\sigma$ . Поэтому для эффективного решения задачи воспользуемся технологией разделения поля на нормальную  $A^0$  (поле в горизонтально-слоистой среде с проводимостью  $\sigma^0$ ) и аномальную  $A^+$  (поле от трехмерных неоднородностей) составляющие:  $A = A^0 + A^+$  [2–4]. Поле в горизонтально-слоистой среде является решением одномерной краевой задачи:

$$-\frac{1}{\mu} \frac{d^2 A^0(z)}{dz^2} + i\sigma^0 \omega A^0(z) = 0,$$

$$\frac{1}{\mu} \frac{dA^0(z)}{dz} \Big|_{z=0} = 1 + 0i, \quad (1)$$

где  $\mu$  — магнитная проницаемость;  $\omega$  — циклическая частота электромагнитного поля;  $i$  — мнимая единица; под комплекснозначной функцией  $A^0$  понимается  $x$ - или  $y$ -компонента вектор-потенциала  $A^0$ .

Для аномальной составляющей поля  $A^+$  выпишем две различные математические модели, выведенные из системы уравнений Максвелла и ориентированные на узловую и векторный методы конечных элементов (МКЭ) соответственно [2]. Для моделирования гармонических по времени

трехмерных электромагнитных полей в средах с однородным коэффициентом магнитной проницаемости  $\mu = \mu_0$  и разрывным коэффициентом электрической проводимости  $\sigma$  в области  $\Omega$  может быть использована система дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} -\frac{1}{\mu_0} \Delta \mathbf{A}^+ + \sigma \operatorname{grad} V + i\sigma\omega \mathbf{A}^+ = \\ = (\sigma - \sigma^0) \mathbf{E}^0; \\ -\operatorname{div}(\sigma \operatorname{grad} V) - i \operatorname{div}(\sigma\omega \mathbf{A}^+) = \\ = -\operatorname{div}((\sigma - \sigma^0) \mathbf{E}^0), \end{cases} \quad (2)$$

где первое уравнение является векторным, а второе — скалярным;  $\mathbf{E}^0 = -i\omega \mathbf{A}^0$  — нормальная составляющая напряженности электрического поля (считается известной величиной). Индукция магнитного поля и напряженность электрического поля определены как  $\mathbf{B} = \operatorname{rot} \mathbf{A}$ ,  $\mathbf{E} = -i\omega \mathbf{A} - \operatorname{grad} V$ . Если же ввести вектор-потенциал так, что  $\mathbf{B} = \operatorname{rot} \mathbf{A}$ ,  $\mathbf{E} = -i\omega \mathbf{A}$ , то для описания аномальной составляющей поля можно использовать векторное уравнение

$$\operatorname{rot} \frac{1}{\mu} \operatorname{rot} \mathbf{A}^+ + i\sigma\omega \mathbf{A}^+ = (\sigma - \sigma^0) \mathbf{E}^0. \quad (3)$$

Математическая модель (2) используется для решения задачи МТЗ узловым МКЭ со скалярными базисными функциями

$$\{\psi_i\}_{i=1}^n \in H^1(\Omega) = \{\psi \in L_2 | \operatorname{grad} \psi \in [L_2(\Omega)]^3\},$$

а математическая модель (3) — для решения задачи МТЗ векторным МКЭ с векторными базисными функциями [5]

$$\begin{aligned} \{\psi_i\}_{i=1}^N \in H(\operatorname{rot}, \Omega) = \\ = (\psi \in [L_2(\Omega)]^3 | \operatorname{rot} \psi \in [L_2(\Omega)]^3), \end{aligned}$$

где  $n$  — число узлов, а  $N$  — число ребер в конечно-элементной сетке. Система (1) решается МКЭ с кусочно-линейными базисными функциями [2].

Особенности применения узлового и векторного МКЭ применительно к трехмерным задачам МТЗ описываются в работах [4, 6, 7]. Для решения конечно-элементных систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) можно применять итерационные методы GMRES [8] и COCG [9]. В случае узлового МКЭ можно находить решение СЛАУ поочередным решением уравнений, соответствующих действительной и мнимой частям вектора неизвестных [10].

### Организация параллельных вычислений

Исследователей-геофизиков интересуют вариации электромагнитных полей в частотном диапазоне, нижняя и верхняя границы которого

приблизительно равны 0,0001 Гц и 500 Гц соответственно, причем периоды соседних гармоник отличаются друг от друга, как правило, в 2 раза. То есть чтобы выполнить расчет одной модели, необходимо решить около 20 относительно независимых подзадач в одной и той же геологической среде, но с различной частотой электромагнитного поля. Заметим, что для каждой частоты необходимо, в свою очередь, выполнить два расчета для двух различных направлений тока (вдоль осей  $Ox$  и  $Oy$ ). Таким образом, для решения одной задачи МТЗ требуется решить около 40 подзадач.

Задача МТЗ, сформулированная в такой постановке, идеально подходит для параллельного исполнения в системах с распределенной памятью. На каждом вычислительном узле независимо от других узлов можно осуществлять сборку и решение конечно-элементной СЛАУ отдельно для каждой частоты и каждого направления тока. Обмен данными между узлами во время решения СЛАУ отсутствует. Время выполнения всей задачи определяется максимальным временем выполнения из всех подзадач. Автором осуществлена параллельная реализация программы для систем с распределенной памятью на основе технологии MPI (Message Passing Interface, <http://www.mpi-forum.org>). Программа рассчитана на работу в локальной сети на компьютерах под управлением операционной системы Windows 2000/XP/Vista.

### Вычислительный эксперимент

Для проведения расчетов была выбрана следующая геоэлектрическая модель. Параметры горизонтально-слоистой среды приведены в табл. 1.

Размеры и проводимость трехмерных объектов указаны в табл. 2.

В конечно-элементной сетке, построенной для данной задачи, содержится 110 073 узлов, 101 148 параллелепипедов, 334 323 ребер. Теллурический ток направлен вдоль оси  $Ox$ . Время решения задачи на компьютере с микропроцессором Intel

Таблица 1  
Параметры горизонтально-слоистой среды для расчетной задачи

№	Толщина слоя, м	Проводимость, См/м
1	60	0,01
2	490	0,003
3	100	0,05
4	650	0,167
5	2500	0,002
6	5000	0,00143
7	25 000	0,001
8	1000	0,0625
9	170 000	0,00143
10	50 000	0,002
11	100 000	0,01

Характеристики трехмерных неоднородностей для расчетной задачи

№	Размеры объекта по x, м	Размеры объекта по y, м	Размеры объекта по z, м	Проводимость объекта, См/м
1	-6000...9000	13 500...16 500	-1300...-900	0,333
2	-3000...9000	13 500...16 500	-900...-500	0,2
3	-5000...-4500	9000...20 000	-1700...-1300	1
4	-3000...-50	14 200...15 500	-500...-400	0,333
5	-6800...-2000	-5400...19 400	-2500...-2300	0,25
6	-20 000...-3000	-50 000...65 800	-30 000...-2500	0,02
7	-3000...9000	-50 000...12 000	-30 000...-2500	0,02

Таблица 3

Сравнение различных итерационных методов для последовательной версии

Частота, Гц	Узловой МКЭ (*)		Узловой МКЭ, GMRES (50)		Векторный МКЭ, СОСГ	
	Время	Число итераций	Время	Число итераций	Время	Число итераций
0,000584	17 с	3	14 мин 14 с	54	32 мин 7 с	15 189
0,00117	17 с	3	15 мин 50 с	60	27 мин 38 с	13 067
0,00233	17 с	3	16 мин 58 с	64	24 мин 35 с	11 624
0,004642	33 с	6	30 мин 52 с	116	22 мин 55 с	10 835
0,00926	1 мин 10 с	13	38 мин 44 с	146	17 мин 50 с	8 439
0,01848	2 мин 37 с	29	48 мин 39 с	179	10 мин 49 с	5 117
0,03687	6 мин 42 с	76	58 мин 55 с	229	8 мин 27 с	4 003
0,07356	14 мин 13 с	164	12 мин 23 с	282	6 мин 55 с	3 276
0,1468	—	>1000	1 ч 15 мин	277	6 мин 4 с	2 875
0,2929	—	>1000	45 мин 15 с	176	5 мин 2 с	2 381
0,5843	—	>1000	21 мин 53 с	85	4 мин 42 с	2 227
1,166	—	>1000	10 мин 18 с	40	4 мин 20 с	2 050
2,326	—	>1000	1 мин 45 с	33	4 мин 1 с	1 884
4,642	—	>1000	8 мин 17 с	23	2 мин 33 с	1 189
9,261	—	>1000	5 мин 44 с	16	3 мин 36 с	1 690
36,87	—	>1000	3 мин 59 с	12	2 мин 31 с	1 213
146,8	—	>1000	2 мин 59 с	10	1 мин 15 с	597
316,2	—	>1000	1 мин 45 с	7	0 мин 49 с	395

(\*) — решение СЛАУ поочередным выполнением уравнений, соответствующих действительной и мнимой части неизвестных [10].

Pentium IV 2,8 ГГц при использовании узлового и векторного МКЭ и различных методов решения СЛАУ приведено в табл. 3. Пример графиков кажущегося сопротивления показан на рисунке.

Из результатов, приведенных в табл. 1, видно, что существенной особенностью решения трехмерных задач МТЗ методом конечных элементов

является характерная зависимость итерационных решателей от частоты поля. Поэтому исходя из полученных результатов была принята следующая стратегия решения трехмерных задач МТЗ: на низких частотах использовать узловой МКЭ с решателем, описанным в [10], а начиная с некоторой частоты (в данной задаче 0,1468 Гц) переключаться на векторный МКЭ с решателем СОСГ.

В табл. 4 приведено время исполнения параллельной версии программы на различном числе компьютеров, объединенных локальной сетью. При этом подзадачи для частот от 0,000584 Гц до 0,07356 Гц решались в постановке для узлового МКЭ с решателем, описанным в [10], а подзадачи для частот от 0,1468 Гц до 316,2 Гц — в постановке для векторного МКЭ с решателем СОСГ.

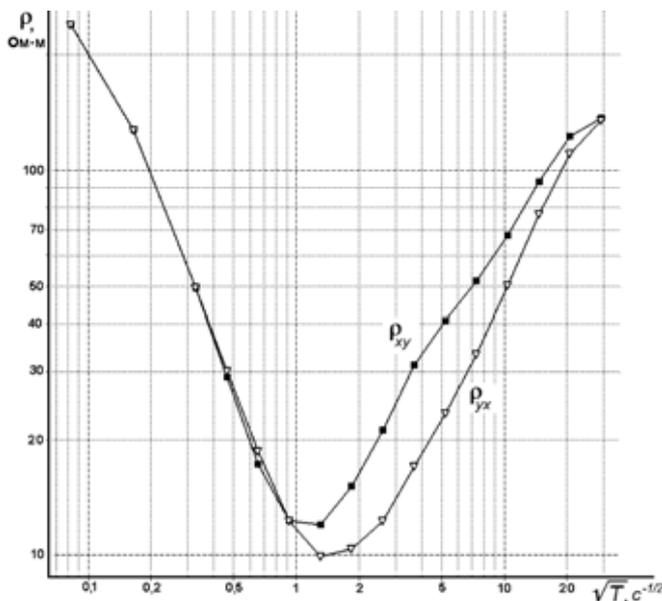
### Заключение

В данной работе описан и реализован подход к распараллеливанию задач моделирования трехмерных гармонических по времени электромаг-

Таблица 4

Время выполнения параллельной версии программы

Число машин	Время
1	1 ч 0 мин 59 с
2	32 мин 55 с
3	24 мин 10 с
4	21 мин 37 с
5	19 мин 20 с
6	17 мин 6 с
7	17 мин 3 с
8	16 мин 44 с
9	15 мин 28 с
10	15 мин 2 с
11	14 мин 13 с



Графики кажущегося сопротивления в билигарифмическом масштабе в точке  $x = -5560$ ,  $y = 14\,460$ ,  $z = 0$

нитных полей для нужд геофизической разведки. Причем реализованная схема распараллеливания практически исключает обмен данными между компьютерами во время вычислений.

Использование комбинации различных математических постановок (узловой и векторный МКЭ) и различных методов решения СЛАУ позволяет добиться ускорения для решения задач МТЗ в широком диапазоне частот.

Также следует отметить, что с помощью разработанного комплекса программ было решено множество практических задач магнитотеллури-

ческих зондирований на нефтеперспективных площадках Восточно-Сибирской платформы.

#### Список литературы

1. **Жданов М. С.** Электроразведка: Учебник для вузов. М.: Недра, 1986 316 с.
2. **Соловейчик Ю. Г., Рояк М. Э., Персова М. Г.** Метод конечных элементов для решения скалярных и векторных задач: Учеб. пособие. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007. 896 с.
3. **Рояк М. Э., Рояк С. Х., Соловейчик Ю. Г.** Конечно-элементное моделирование трехмерных гармонических электромагнитных полей в задачах аэроэлектроразведки кимберлитовых трубок // Сибирский журнал индустриальной математики. Июль—декабрь. 1998. Т. 1. № 2. С. 154—168.
4. **Домников П. А.** Моделирование трехмерных электромагнитных полей для магнитотеллурических зондирований узловым и векторным МКЭ // Сб. науч. трудов НГТУ. 2008. № 1 (51). С. 55—60.
5. **Nedelec J. C.** Mixed Finite Elements in  $R^3$  // Numer. Math. 1980. Vol. 35. N 3. P. 315—341.
6. **Домников П. А.** Сравнение векторного и узлового метода конечных элементов для моделирования трехмерных электромагнитных полей в задачах магнитотеллурического зондирования // Матер. Российской научно-технической конф. "Информатика и проблемы телекоммуникаций", Новосибирск, 2008. Т. 1. С. 45—48.
7. **Домников П. А.** Моделирование трехмерных магнитотеллурических полей векторным методом конечных элементов // Матер. IX Междунар. конференции "Актуальные проблемы электронного приборостроения", Новосибирск. 2008. Т. 6. С. 93—98.
8. **Saad Y., Schultz M.** GMRES: a generalized minimal residual algorithm for solving nonsymmetric linear systems // SIAM J. Sci. Comput. 1986. Vol. 7. P. 856—869.
9. **Van der Vorst H. A., Melissen J. B. M.** A Petrov-Galerkin type method for solving  $Ax = b$ , where  $A$  is symmetric complex // IEEE Transaction on Magnetics. 1990. Vol. 26. N 2. P. 706—708.
10. **Домников П. А.** Об одном методе решения систем конечно-элементных уравнений, возникающих в задачах моделирования низкочастотных электромагнитных полей // Матер. Всероссийской научной конф. молодых ученых "Наука. Технологии. Инновации". Новосибирск: Изд-во НГТУ. 2008. Ч. 1. С. 72—74.

#### НОВАЯ КНИГА ПО ИНФОРМАТИКЕ

**Колин К. К. Актуальные философские проблемы информатики:** Учебное пособие / Теоретические проблемы информатики. — Т. 1. Под общей редакцией К. И. Курбакова. — М.: КОС · ИНФ, 2009. — 222 с.

В книге рассматривается история зарождения и развития информатики как науки, эволюция ее предметной области, современные философские и научно-методологические проблемы, а также перспективы развития информатики как самостоятельной отрасли науки. Пособие предназначается для преподавателей, аспирантов и студентов высших учебных заведений, а также для тех категорий читателей, которые интересуются состоянием, проблемами и перспективами развития современной науки. Оно может быть также использовано аспирантами и соискателями ученой степени кандидата наук при их подготовке к сдаче кандидатского экзамена по курсу "История и философия науки".

#### Основные разделы:

- Глава 1. Краткая история развития информатики.
- Глава 2. Информатика в современной системе наук.
- Глава 3. Философские проблемы информатики.
- Глава 4. Новая информационная реальность и социальная информатика.
- Глава 5. Информатика и образование.
- Глава 6. Перспективные направления развития информатики.

Книга содержит достаточно большой список литературы для самостоятельного изучения, а в приложениях приведены программы учебных курсов "Историко-философское введение в проблемы информатики" и "Социальная информатика" для аспирантов и магистров вузов.

Более подробная информация о книге приведена на сайте Института проблем информатики РАН [www.ipiran.ru](http://www.ipiran.ru) (раздел "Публикации").

Д. А. Девятьяров, аспирант,  
Московский государственный университет  
им. М. В. Ломоносова,  
e-mail: devetyarov@gmail.com

## Нечеткие дескрипторы молекул в задаче "структура—свойство"

*Проведен анализ применения нечетких дескрипторов — новой модели представления данных в задаче "структура—свойство". Показано, что вычислительная сложность алгоритма повышается при использовании данной модели, однако может быть существенно уменьшена за счет эволюционного построения. Результаты применения нечетких дескрипторов к токсичности бициклобисмочевины продемонстрировали перспективность использования модели.*

**Ключевые слова:** задача "структура—свойство", 3D-QSAR, молекулярные графы, молекулярные дескрипторы, нечеткие множества, эволюционный алгоритм, оценка вычислительной сложности

Настоящая работа посвящена анализу применения нечетких дескрипторов — новой модели представления данных в задаче поиска функциональной зависимости "структура—свойство" (QSAR) [1]. Задача состоит из двух этапов: на этапе описания по структуре каждой молекулы строится вектор атрибутов—дескрипторов; затем на этапе анализа по численным векторам дескрипторов прогнозируется активность с помощью методов машинного обучения. В [2] на этапе описания были использованы структурные трехмерные дескрипторы — пары и тройки особых точек (ОТ), найденных на триангулированной молекулярной поверхности. В [3] описаны недостатки структурных дескрипторов и предложено от них избавиться с помощью аппарата нечеткой логики при использовании нечетких дескрипторов.

В данной работе мы восполняем пробел по оценке вычислительной сложности решения задачи "структура—свойство" при использовании четких и нечетких дескрипторов, а также при эволюционном построении дескрипторов. Показано, что использование нечетких дескрипторов является более вычислительно сложным по сравнению с четким описанием, но эволюционное построение позволяет существенно снизить число операций. Также проведен анализ применения данного подхода к общей токсичности бициклобисмочевины, который продемонстрировал улуч-

шение качества прогноза при использовании нечетких дескрипторов.

### Оценка вычислительной сложности

Поскольку применение нечетких дескрипторов может существенно увеличить вычислительную сложность алгоритмов, мы провели анализ вычислительной сложности решения задачи "структура—свойство" с помощью четких и нечетких дескрипторов. В целях уменьшения числа операций в [4] предложено использовать эволюционное построение дескрипторов: дескрипторы  $k$ -го порядка формируются не на основе всех дескрипторов, а только на основе наиболее информативных дескрипторов ( $k - 1$ -го порядка).

Обозначим:

$T$  — число меток (классов) ОТ;

$N$  — максимальное число ОТ в молекулярном графе;

$D_k$  — число нечетких множеств, заданных на интервале значений расстояния между структурным фрагментом  $k$ -го уровня (ОТ, парой или тройкой ОТ) и ОТ;

$Q$  — число наиболее информативных дескрипторов, на основе которых формируются дескрипторы следующего уровня;

$S_{\text{опис}}^k, F_{\text{опис}}^k, E_{\text{опис}}^k$  — число операций этапа описания при использовании структурных дескрипторов, нечетких дескрипторов и при эволюционном построении нечетких дескрипторов соответственно;

$S_{\text{мгуа}}^k, F_{\text{мгуа}}^k, E_{\text{мгуа}}^k$  — аналогичные показатели для этапа построения классифицирующей модели (в качестве метода построения прогнозирующей функции рассматривается метод группового учета аргументов (МГУА) [5]).

Справедлива следующая теорема.

**Теорема.** Имеют место следующие оценки:

$$\text{а) } F_{\text{опис}}^k = S_{\text{опис}}^k O\left(\prod_{i=1}^k D_i\right);$$

$$\text{б) } S_{\text{мгуа}}^k = F_{\text{мгуа}}^k = E_{\text{мгуа}}^k O\left(T^{k-1} \prod_{i=2}^k D_i / Q\right).$$

**Доказательство.** Утверждения теоремы следуют из оценок для  $S_{\text{опис}}^k, F_{\text{опис}}^k, E_{\text{опис}}^k, S_{\text{мгуа}}^k, F_{\text{мгуа}}^k, E_{\text{мгуа}}^k$ , приведенных в табл. 1. Первая и вторая строки таблицы отражают оценку вычислительной сложности этапа вычисления алфавита дескрипторов и этапа построения классифицирующей модели соответственно. Оценки второго этапа следуют из того факта, что при использовании МГУА в качестве метода классифи-

\* Работа частично поддержана грантом РФФИ 07-07-00282.

Таблица 1

Вычислительная сложность отдельных этапов решения задачи "структура — свойство" при использовании разных алфавитов дескрипторов

Этап задачи "структура — свойство"	Четкие дескрипторы	Нечеткие дескрипторы	Нечеткие дескрипторы эволюционным построением
Этап описания	$O(N^k)$	$O(N^2 \prod_{i=2}^k D_i)$	$O(N^2 \prod_{i=2}^k D_i)$
Этап анализа	$O(T^2 \prod_{i=2}^k D_i)$	$O(T^2 \prod_{i=2}^k D_i)$	$O(QT D_k)$

Таблица 2

Сравнение качества прогноза по результатам применения МГУА-kNN к нечетким дескрипторам, построенным для свойства общей токсичности бициклобисмочевины

Число интервалов расстояний ОТ—ОТ	Число интервалов расстояний ОТ—(пара ОТ)	Четкие дескрипторы	Нечеткие трапециевидные дескрипторы	Нечеткие треугольные дескрипторы
2	2	81,8 %	78,8 %	84,8 %
2	3	75,8 %	81,8 %	81,8 %
3	2	75,8 %	81,8 %	96,9 %
3	3	78,8 %	87,9 %	81,8 %
Среднее значение		78,0 %	82,6 %	86,3 %

кации вычислительная сложность второго этапа пропорциональна числу дескрипторов.

Теорема доказана.

Из теоремы следует, что применение нечетких дескрипторов увеличивает сложность построения алфавита дескрипторов по сравнению с использованием четких дескрипторов, однако не увеличивает сложность построения прогнозирующей функции. При этом эволюционное построение нечетких дескрипторов позволяет существенно снизить общее число операций.

#### Анализ "нечеткости" дескрипторов на примере общей токсичности бициклобисмочевины

Нечеткие дескрипторы были применены к прогнозированию общей токсичности бициклобисмочевины. Для 33 соединений выборки была предоставлена их молекулярная структура с химико-физическими свойствами, было необходимо спрогнозировать класс их токсичности. Выборка обработана в рамках совместной работы с Институтом органической химии им. М. Д. Зелинского РАН. Сформированы 12 матриц "молекула—признак", соответствующих разным наборам следующих параметров формирования дескрипторов:

- число интервалов разбиения расстояния между ОТ;
- число интервалов разбиения расстояния между ОТ и парами ОТ;
- тип функции принадлежности (четкие, нечеткие трапециевидные и нечеткие треугольные функции принадлежности [3]).

В качестве классификатора использован метод МГУА-kNN [6]. Результаты его применения приведены в табл. 2.

Результаты показали, что максимальное значение качества прогноза (96,9 %) и лучшее среднее качество прогноза (86,3 %) достигаются при использовании треугольных нечетких дескрипторов, наиболее отличных от четких дескрипторов, что подтверждает преимущество нечеткого описания.

### Заключение

Нечеткие дескрипторы являются обобщением четких структурных дескрипторов с введением дополнительного параметра построения, отражающего "четкость" функций принадлежности. Данное преимущество позволяет решить проблему корректной обработки гибких молекул и осуществлять автоматическую оптимизацию описания молекулы [3].

### Список литературы

1. Karelson M. Molecular Descriptors in QSAR/QSPR. Wiley-Interscience, 2000.
2. Svitanko I. V., Devetyarov D. A., Tchekoukov D. E., Dolmat M. S., Zakharov A. M., Grigoryeva S. S., Chichua V. T., Ponomareva L. A., Kumskov M. I. QSAR Modeling on the Basis of 3D Descriptors Representing the Electrostatic Molecular Surface (Ambergris Fragrances) // Mendeleev Communications. 2007. Vol. 17. N 2. P. 90—91.
3. Devetyarov D. A., Zaharov A. M., Kumskov M. I., Ponomareva L. A. Fuzzy logic application for construction of 3D descriptors of molecules in QSAR problem // Proc. 8th Intern. Conf. "Pattern Recognition and Image Analysis: New Information Technologies" (PRIA-8-2007), Yoshkar-Ola. 2007. Vol. 2. P. 249—252.
4. Григорьева С. С., Девятьяров Д. А., Свитанько И. В., Пермяков Е. А., Апрышко Г. Н., Кумсков М. И. Поиск представлений 3D структур гибких молекул в задаче прогнозирования биологической активности // Система прогнозирования свойств химических соединений: Алгоритмы и модели. Сб. науч. работ. М.: МАКС Пресс, 2008. С. 10—36.
5. Kumskov M. I., Mityushev D. F. Group Method of Data Handling (GMDH) as Applied to Collective Property Estimation of Organic Compounds by an Inductive Search of Their Structural Spectra // Pattern Recognition and Image Analysis. 1996. Vol. 3. N 3. P. 497—509.
6. Девятьяров Д. А., Кумсков М. И., Апрышко Г. Н., Носевич Ф. М., Прохоров Е. И., Первозников А. В., Пермяков Е. А. Сравнительный анализ применения нечетких дескрипторов при решении задачи "структура—свойство" // Доклады 14-й Всероссийской конференции "Математические методы распознавания образов" ММРО-2009. М.: МАКС Пресс, 2009. С. 511—514.

**А. Ю. Силина**, специалист,  
ВФ ООО "СУПР", e-mail: silinaa@mail.ru,  
**И. В. Гермашев**, канд. техн. наук., доц.,  
Волгоградский государственный  
педагогический университет,  
**В. Д. Васильева**, канд. техн. наук, доц.,  
**В. Е. Дербишер**, д-р хим. наук, проф.,  
Волгоградский государственный  
технический университет

## Комплексная оценка научной деятельности

*Предложена методика построения комплексного критерия при оценке научной деятельности на основе ряда наукометрических показателей.*

**Ключевые слова:** оценка научной деятельности, наукометрия, наукометрические показатели

### Введение

В настоящее время широко развиваются наукометрические методы оценки научной деятельности. Для этой цели сформировался довольно обширный перечень показателей (известно более 50 [1]), каждый из которых, как правило, предназначен для оценки отдельных сторон научной деятельности и в связи с этим имеет ограниченные возможности для оценки научной деятельности объектов в целом. Объектами научной деятельности в данном случае являются как отдельные ученые, так и коллективы различных научных сообществ. В большинстве случаев при оценке научной деятельности используются показатели, характеризующие только один конкретный параметр: число публикаций, число патентов, число ссылок на статью или конкретного автора.

Анализ наукометрических показателей, проведенный авторами [2], показал, что пока объективно не выработано единых подходов к оценке научной деятельности. Однако имеется хорошая основа для развития данного направления, в частности, для создания комплексной оценки, включающей набор разрозненных характеристик. Для этого необходимо иметь математический аппарат приведения разнокачественных частных показателей к некоторой общей норме.

В данной статье предложена методика построения комплексной оценки научной деятельности, предназначенная для социологических, маркетинговых, экспертных, прогнозных исследований, связанных с научной деятельностью, и принятия в этой области обоснованных решений.

### Экспертная оценка и определение веса наукометрических показателей

В целях упорядочения и приведения к единой системе измерений множества разнокачественных наукометрических показателей было проведено их ранжирование экспертным методом. В качестве экспертов были привлечены известные ученые ведущих вузов и научно-исследовательских центров Волгограда и южного региона России.

Экспертам предлагалось оценить наукометрические показатели, проставив баллы каждому показателю по предложенной шкале, отражающей их характеристики. Шкала разработана по аналогии с применяемой Российским фондом фундаментальных исследований (РФФИ) для оценки заявок на гранты [1] и включает следующий комплекс характеристик:

- число составляющих в формуле — число критериев, по которым оценивается научная деятельность;
- степень усовершенствования по сравнению с прототипом — отличие от ранее используемого аналога формулы, степень нестандартного подхода к оценке по сравнению с подобными показателями;
- число повторяемости составных частей — интенсивность использования одних и тех же составляющих;
- степень унификации — возможность применения методики к другим объектам, а также готовность показателя к изменению;
- число объектов, оцениваемых показателем — масштабность применения показателя в различных сферах научной деятельности.

По результатам экспертного опроса составлена матрица (табл. 1), в строках которой приведена оценочная шкала, включающая названные характеристики, в столбцах представлены наукометрические показатели. Элементами матрицы являются баллы от 0 до 10, выставленные экспертами.

Для количественного описания итоговой оценки, выставленной коллективом опрошенных экспертов, использован метод средних арифметических рангов (баллов) [3]. Результаты расчета приведены в табл. 2.

Таким образом, порядок по средним арифметическим рангам экспертных оценок имеет вид

$$\text{СППА}(S, U) < \text{ПРНД} < \text{IF} < \text{h-индекс} < \\ < \text{РП-фактор} < M_{\text{ППИ}}$$

Запись типа " $\text{СППА}(S, U) < \text{ПРНД}$ " означает, что показатель  $\text{СППА}(S, U)$  предшествует показателю ПРНД (т. е. показатель  $\text{СППА}(S, U)$  лучше показателя ПРНД по представленным характеристикам).

Характеристика наукометрических показателей эффективности научной деятельности

Характеристика показателей	Наукометрические показатели					
	Импакт-фактор	Системный показатель публикации-онной активности	Показатель российской научной деятельности	Индекс Хирша	РП-фактор	Мощность, потока патентной информации
	IF	СППА(S, U)	ПРНД	h-индекс	РП-фактор	М <sub>ППИ</sub>
Число составляющих в формуле	2	6	7	2	3	1
Степень усовершенствования по сравнению с прототипом (конструкторской преемственности)	10	10	10	10	7	10
Число повторяемости составных частей	9,5	8	9	9,5	10	1
Число объектов, оцениваемых показателем	7,5	7,5	2,5	9	2,5	2,5
Степень унификации	5	10	10	2	4	1

Таблица 2

Сводные данные экспертной оценки

Характеристика показателей	Наукометрические показатели					
	Импакт-фактор	Системный показатель публикации-онной активности	Показатель российской научной деятельности	Индекс Хирша	РП-фактор	Мощность, потока патентной информации
	IF	СППА(S, U)	ПРНД	h-индекс	РП-фактор	М <sub>ППИ</sub>
Сумма экспертных оценок	34	41,5	38,5	32,5	26,5	15,5
Среднее арифметическое экспертных оценок	6,8	8,3	7,7	6,5	5,3	3,1
Итоговый порядок сравнительной оценки	3	1	2	4	5	6

Полученные ранги частных показателей позволяют выработать способы агрегирования многокритериальной информации в некоторые итоговые количественные оценки.

Для определения значимости каждого показателя необходимо каждому наукометрическому показателю присвоить вес  $\alpha_j \in [0; 1]$ ,  $j = \overline{1, n}$ , такой

что  $\sum_{j=1}^n \alpha_j = 1$ , где  $n$  — число показателей (в нашем случае  $n = 6$ ).

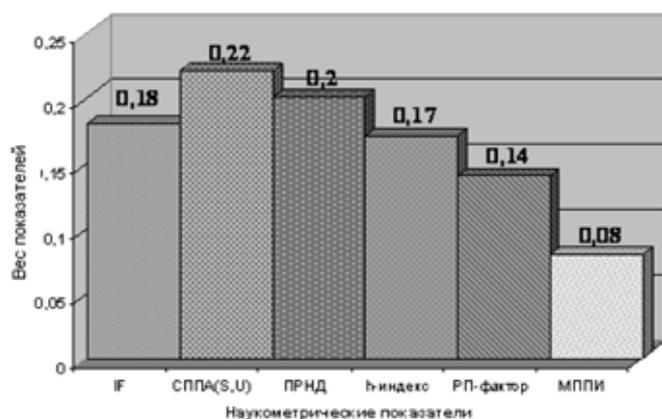


Рис. 1. Веса наукометрических показателей

Положим

$$\alpha_j = \frac{\beta_j}{\sum_{j=1}^n \beta_j}, \quad (1)$$

где  $j$  — наукометрический показатель  $\forall j = \overline{1, n}$ ;  $\beta_j$  — ненормированный вес показателя.

Например, при  $j = 1$  получим

$$\alpha_1 = \frac{\beta_1}{\sum_{j=1}^n \beta_j} = \frac{6,8}{6,8 + 8,3 + 7,7 + 6,5 + 5,3 + 3,1} = 0,18.$$

Аналогично вычисляются остальные веса значимости  $\alpha_j$ . Результаты вычислений представлены графически на рис. 1.

Таким образом, наиболее весомым среди представленных наукометрических показателей, согласно опросу респондентов, является показатель СППА(S, U), а наименее значимым — показатель М<sub>ППИ</sub>.

### Нормирование значений наукометрических показателей

Далее для решения поставленной задачи возникает необходимость нормирования значений

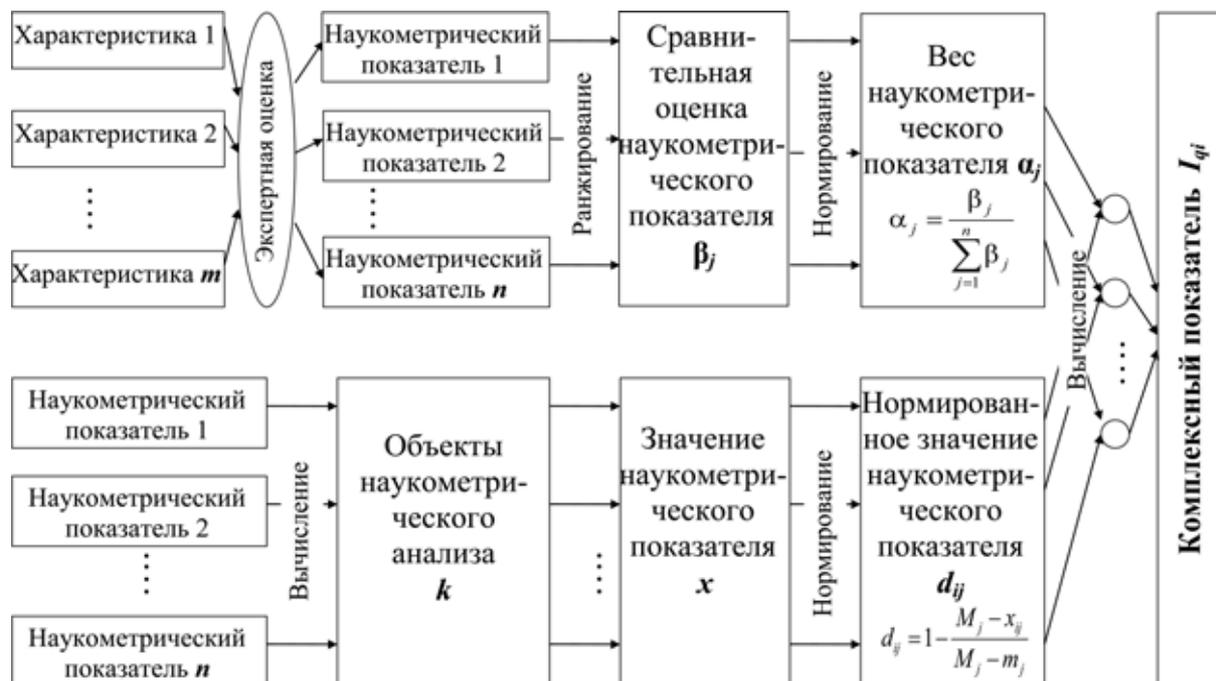


Рис. 2. Общая схема определения комплексного показателя  $I_{qi} = \sum_{j=1}^n \alpha_j d_{ij}$

показателей, полученных при наукометрическом анализе объектов научной деятельности.

Использование того или иного метода нормирования зависит от таких факторов, как доступность сравнительных данных, трудоемкость и специфика расчета. В данном случае для нормирования значений наукометрических показателей предлагается следующая формула:

$$d_{ij} = 1 - \frac{M_j - x_{ij}}{M_j - m_j}, \quad (2)$$

где  $i$  — объект наукометрического анализа,  $i = \overline{1, k}$ ;  $k$  — число объектов наукометрического анализа;  $M_j$  — максимальное значение показателя  $j$ ;  $m_j$  — минимальное значение показателя  $j$ ;  $x_{ij}$  — текущее значение показателя  $j$ .

Значение  $d_{ij}$  определяется в интервале  $[0...1]$ . Расчет по данной формуле позволяет привести ряд разнородных наукометрических показателей к приведенному значению, что в дальнейшем способствует объединению данной информации в одной формуле и позволяет получить сравнимые (адекватно описываемые) данные.

#### Определение комплексного показателя оценки научной деятельности

Имея веса частных наукометрических показателей и нормированные значения этих показателей, можно рассчитать комплексный показатель

оценки эффективности научной деятельности  $I_{qi}$  по следующей формуле:

$$I_{qi} = \sum_{j=1}^n \alpha_j d_{ij}, \quad (3)$$

где  $n$  — число наукометрических показателей, используемых для комплексной оценки;  $d_{ij}$  — нормированное значение наукометрического показателя;  $\alpha_j$  — вес наукометрического показателя.

Состав наукометрических показателей зависит от объекта и цели анализа, наличия необходимой информации и потребной полноты оценки.

На рис. 2 представлена общая схема расчета комплексного наукометрического показателя.

#### Реализация методики

Предлагаемая методика определения комплексного показателя оценки научной деятельности опробована на массиве баз данных электронной научной библиотеки Elibrary [http://www.elibrary.ru] и научно-технической библиотеки Волгоградского государственного технического университета (ВолгГТУ). Для наукометрического анализа на основе публикаций в качестве объектов приняты научные сотрудники ВолгГТУ. Результаты наукометрического анализа представлены в табл. 3.

Значения IF, h-индекс, РП-фактор получены из базы данных Elibrary [4], значения  $M_{ППИ}$ , ПРНД взяты из базы данных библиотеки ВолгГТУ,

## Результаты наукометрического анализа

№ п/п	Наукометрические показатели	Значение показателей для объекта научной деятельности $x_{ij}$								
		$i$								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	IF	0,13	0,6	0	0	0	0,67	0	0,1	0,34
2	СППА(S, U)	320,05 155,45	1669,6 740,74	250,69 39,58	1146,2 652,66	1105,92 539,51	197,77 45,43	19,98 2,36	251,28 106,87	3259,3 675,74
3	ПРНД	0,48	7,19	10,41	2,18	1,13	1,27	0,10	1,03	8,05
4	$h$ -индекс	1	6	0	0	0	3	0	1	7
5	РП-фактор	212,8	393,4	296,5	83	105,2	319	0	260,6	1595,5
6	$M_{ппи}$	7	13	6	0	0	3	0	1	31
Комплексный показатель $I_{qi}$		0,169	0,844	0,268	0,318	0,263	0,336	0,000	0,141	1,056

значения (СППА(S, U)) получены с помощью методики, описанной в [5]. Перечисленные показатели, представленные в табл. 3, явились основой для многокритериальной оценки.

Для расчета комплексного многокритериального показателя возникает необходимость проводить вычисления с разнородными данными. Одним из способов решения этой проблемы является приведение данных к единой шкале по формуле (2).

Пример расчета для объекта № 1 из табл. 3 приведен ниже.

Нормированное значение показателя № 1 (IF) для объекта наукометрического анализа № 1

$$d_{11} = 1 - \frac{M_1 - x_{11}}{M_1 - m_1} =$$

$$= 1 - (0,67 - 0,13)/(0,67 - 0) = 0,194.$$

Далее определяется комплексный показатель следующим образом:

$$I_{q1} = \sum_{i=1}^n \alpha_j d_{ij} = 0,18 \cdot 0,19 +$$

$$+ 0,22 \cdot 0,09 + 0,22 \cdot 0,21 + 0,2 \cdot 0,04 +$$

$$+ 0,17 \cdot 0,14 + 0,14 \cdot 0,13 + 0,08 \cdot 0,23 = 0,169.$$

Аналогично вычисляется комплексный показатель для других объектов (см. табл. 3).

Сравнение полученных числовых значений комплексных показателей оценки научной деятельности различных объектов (в данном случае сотрудников университета) может являться отправной точкой для анализа их работы и принятия различного рода управляющих решений.

### Заключение

Таким образом, предложенная методика комплексной оценки, основываясь на множестве разнонаправленных наукометрических показателей и статистических и экспертных методов при подго-

товке массивов данных, позволяет учесть многие аспекты научной деятельности. Методика обладает достаточно гибкой структурой, и ее составляющие компоненты можно вводить в действие избирательно в различной совокупности с учетом поставленных целей, выбранных приоритетов, а также финансовых и технических возможностей. Данная методика не исключает возможности обратной идентификации, т. е. процедуры "возвращения" к исходным показателям и анализу конкретных факторов, повлиявших на комплексный показатель.

Доступность математического аппарата и возможность оперативной обработки на ЭВМ позволяет проводить подобный анализ для любого научного направления, учреждения, коллектива ученых и индивидуальных исследователей.

Использование данного комплексного показателя, наиболее полно характеризующего научную деятельность, самым положительным образом может повлиять на эффективность управления научной деятельностью. Полученные результаты могут быть использованы при планировании новых научных направлений, проведении мониторинга и составлении картографирования науки в различных областях.

### Список литературы

1. Проблема оценки научной деятельности [Электронный ресурс]. [2006]. URL: <http://www.quality.edu.ru/quality/sk/param/489/>
2. Силина А. Ю., Васильева В. Д., Дербишер В. Е., Гермашев И. В. Систематизация наукометрических показателей эффективности научной деятельности // Информационные технологии. 2009. № 6. С. 53–56.
3. Орлов А. И. Теория принятия решений: Учеб. пособие. М.: Март, 2004. 656 с.
4. Научная электронная библиотека [Электронный ресурс]. [2009]. URL: <http://elibrary.ru/authors.asp>
5. Гермашев И. В., Силина А. Ю., Васильева В. Д., Дербишер В. Е. Обработка нечетких данных для оценки активности публикаций научного работника // Информационные технологии. 2008. № 12. С. 12–14.

# CONTENTS

**Antonchenkov A. A. Problems of Three Dimensional Visualization in GIS and the Solution Software Prototype . . . . . 2**

This article gives the overview of the problem of developing systems used for the fast real time three dimensional modeling in GIS. It presents the comprehensive approach based on using of hardware support and modern optimization algorithms to solve those problems. Also there is the prototype description which has been developed using the suggested approach.

**Keywords:** GIS, three dimensional graphics, hardware support, OpenGL library, optimization algorithms, occlusion culling

**Bobkov V. A., Morozov M. A. Urban Scenes Photo Vectorization for BD-Reconstruction . . . . . 5**

New approach is suggested to vectorization of urban scenes images for SD-reconstruction purposes. The approach is based on combination of Canny edge detector, image thinning and vectorization. The main feature of the method consists in special data processing stages for increasing vectorization quality in SD-reconstruction task. Two algorithms are presented: the first is oriented for linedetection in camera calibration routine and the second — for vector frame creation in 3D-reconstruction of urban buildings.

**Keywords:** image edge detection, vectorization, 3D-reconstruction, camera calibration

**Bushmeleva K. I., Plusnin I. I., Uvaysov S. U. Model of Mobile Device of Gas Pipeline Distance Sound . . . . . 11**

The mathematical model of the device has been developed in the frames of distant sound. The device is locator which diagnoses technical state of linear part of gas pipeline using laser sounding of underlying surface from the board of helicopter.

**Keywords:** mathematical model, diagnostics, gas pipeline, laser locator, coefficient of reflection, underlying surface, system of automatic control

**Grushin A. I., Rostovtsev A. V., Trinh Quang Kien. Data Stream Packing Unpacking for Globa Sputnik Navigation System . . . . . 15**

Microprocessor system based on the NeuroMatrixS (NMC3) core is used in the Russian Global Sputnik Navigation System GLONASS. To transform data streams into the convenient format for processing in NMC3 data streams are unpacked, to store in memory they are packed. Pack/unpack unit (PU) does this job.

**Keywords:** data stream, packing, unpacking, matrix, Global Sputnik Navigation System

**Aliyev I. M. Traffic Control for Transit BGP/MPLS-Network . . . . . 19**

In this article is considered a model of traffic management in transit BGP/MPLS-networks. As a criterion of optimization is been used the cost of delivery traffic with the requirements of SLA-agreements, as well as characteristics of the network.

**Keywords:** BGP/MPLS network, prefix, autonomous systems, penalty function, traffic, Service Level Agreement, delay, bandwidth

**Shahov V. G., Kovalenko O. N. Model of Distributing of Carrying Capacity of Ductings of Multiservice Network between Threads with the Different Parameters of Quality of Service . . . . . 23**

In work the technique of an estimation of a status of a bunch of channels of a multiservice network is offered at integration speech, video of traffic and traffic of packages of the data on the basis of strategy with mobile border. Numerical characteristics of indicators of quality of the service are resulted, received on the basis of the developed algorithms.

**Keywords:** network, service, intregraciya, division, quality, losses

**Medvedeva E. V. Nonlinear Filtration Statistically Connected Videosequences of Digital Half-Tone Images . . . . . 27**

The method of synthesis of algorithms a filiations of statistically connected videosequences digital half-tone images is considered at the big intensity Gaussian noise. The filtration method is based on representation videosequence by multivariate discontinuous Markov processes. Algorithms are effective in conditions of action of white Gaussian noise of the big intensity. Algorithms demand for the realization small computing resources.

**Keywords:** nonlinear filtration, Markov process, the digit binary image, digital half-tone picture, videosequence, statistically connected videosequences

**Koptcov A. A., Pronkin Yu. N. On One New Method of Object Detection . . . . . 33**

This article is devoted to the new way of object detection on video frames. A mathematical description is presented of the method which uses background frames but is completely different from commonly used for such purpose differential methods. The main advantage of the method under consideration is its increased robustness in conditions of lightening changes or in presence of irrelevant fluctuations (such as wavering foliage, precipitations, camera noises and other similar effects) or any other factors which impede the detection procedure. A comparative analysis is then given of this new algorithm against traditional differential-background algorithms of detection.

**Keywords:** object detection, video surveillance systems, background estimation, distinguishing objects from background

- Zhernakov S. V.** *Identification of Aviation Engine Parameters on the Bases of Neural Networks* . . . . . 39  
 The approach to identification of aviation engine parameters on the bases of neural networks is proposed in this paper. The method of systems design for identification of aviation engine parameters on the bases of neural networks that can be applied during bench testing and debugging is discussed.  
**Keywords:** fault-tolerance, checking, diagnosis, neural networks
- Gomenyuk S. M., Emel'yanov A. O., Karpenko A. P., Chernezov S. A.** *Review of Optimal Insulin Dose Forecasting Methods and Systems for Insulin-Dependant Diabetes Patients* . . . . . 48  
 English language publications covering optimal insulin doses forecasting methods and systems for insulin-dependant diabetes patients are presented in this review. Mathematical models of insulin dynamics in human body, neural network-based and composite algorithms and optimal insulin dose forecasting systems are considered.  
**Keywords:** insulin dependant diabetes mellitus, type I diabetes, insulin-glucose dynamics mathematical models, neural network-based insulin dose forecasting systems
- Ostreikovskiy V. A., Droggin E. V., Fedorov D. A.** *About Formalization of a Subject domain of Decision-Making of Doctor-Surgeon "Atherosclerosis"* . . . . . 58  
 The questions about formalization of a subject domain of intellectual information system with support of decision-making of doctor — surgeon "Atherosclerosis" are considered in the article. By methods of the correlation analysis are made: an estimation of a choice of experts, coordination of their opinions. Also the factors rendering the greatest risk on occurrence and development of an obliterating atherosclerosis of vessels of bottom finitenesses are investigated and the clinical conditions are determined diagnosing the given disease more completely. Using regression analysis methods the article investigates the factors that influence upon obliterating atherosclerosis of arteries of the bottom finiteness's treatment. The given results allow forming the structure of database and knowledgebase of "Atherosclerosis" which are the most intellectual information system knowledgebase.  
**Keywords:** formalization of a subject domain, expert analysis, intellectual information system, system of support with decision-making, correlation and regression analysis
- Tokmachev M. S., Ryazancev P. P.** *Creation of the Personified Database and Program Implementation of Research of the Local Population Health* . . . . . 64  
 The personified database of disease and death rate of the population of the Novgorod region is generated. On the basis of ICD-10 and the received database classification of states of health is developed and the software numerically realizing an authoring technique of research of health of the population is created. Some numerical results are resulted.  
**Keywords:** personified database (PDB), software, Markov chains, states of health, International Classification of Disease (ICD-10), hierarchy of classes, stochastic matrix, probability, the forecast
- Domnikov P. A.** *Parallelization of Finite Element Modeling of 3D Magnetotelluric Problems* . . . . . 69  
 An approach for parallel implementation of 3D magnetotelluric problems by frequencies is considered. Mathematical formulations for nodal and vector finite element method with separation of ID part of field are described. A computational experiment for certain magnetotelluric problem is carried out. Proposed approach for parallelization is well suited for solving magnetotelluric problems at local network.  
**Keywords:** finite element method, magnetotelluric sounding, parallel programming
- Devetyarov D. A.** *Fuzzy Molecular Descriptors in Quantitative Structure-Activity Relationship Problem* . . . . . 73  
 The paper demonstrates the analysis of the application of fuzzy descriptors — a new data representation model in quantitative structure-activity relationship problem. We show that the use of fuzzy descriptors increases the computational complexity of the algorithm, but the evolutionary method allows us to significantly decrease it. The results of fuzzy description application to general toxicity of chemical compounds demonstrate that the new model is useful.  
**Keywords:** QSAR, 3D-QSAR, molecular graphs, molecular descriptors, fuzzy sets, evolutionary algorithm, computational complexity estimation
- Silina A. Yu., Germashev I. V., Vasilyeva V. D., Derbisher V. E.** *The Complex Estimation of Scientific Activity* . . . 75  
 The method for constructing the complex estimation of scientific activity on the basis of the set of scientometric indicators is proposed.  
**Keywords:** estimation of scientific activity, scientometrics, scientometrics indicators

---



---

**Адрес редакции:**

107076, Москва, Стромьинский пер., 4

Телефон редакции журнала **(499) 269-5510**

E-mail: [it@novtex.ru](mailto:it@novtex.ru)

Дизайнер *Т.Н. Погорелова*. Технический редактор *О. А. Ефремова*.

Корректор *Т. В. Зверева*

Сдано в набор 29.12.2009. Подписано в печать 16.02.2010. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 9,8. Уч.-изд. л. 11,30. Заказ 153. Цена договорная.

Журнал зарегистрирован в Министерстве Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций.

Свидетельство о регистрации ПИ № 77-15565 от 02 июня 2003 г.

Отпечатано в ООО "Подольская Периодика"

142110, Московская обл., г. Подольск, ул. Кирова, 15