

# ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Том 23  
2017  
№ 9

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Издается с ноября 1995 г.

УЧРЕДИТЕЛЬ  
Издательство "Новые технологии"

## СОДЕРЖАНИЕ

### ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

- Вишнеков А. В., Иванова Е. М.** Применение методов поддержки принятия решений при построении сетей доступа . . . . . 627
- Сорокин А. Б., Смольянинова В. А.** Концептуальное проектирование экспертных систем поддержки принятия решений . . . . . 634
- Коляда А. А.** Обобщенная интегрально-характеристическая база модулярных систем счисления . . . . . 641

### МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ

- Прилуцкий М. Х., Власов В. С., Кривошеев О. В.** Задачи оптимального планирования как задачи распределения ресурсов в сетевых канонических структурах . . . . . 650

### ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ И ИЗОБРАЖЕНИЙ

- Филиппов Б. И.** Передача телеметрической информации по гидроакустическому каналу связи . . . . . 658
- Терехин А. В.** Подход к классификации невыпуклых проекций трехмерных объектов по диагональным отрезкам с использованием коротежей . . . . . 663

### БЕЗОПАСНОСТЬ ИНФОРМАЦИИ

- Дворников С. В., Пшеничников А. В., Манаенко С. С., Дворников С. С.** Метод формирования многопозиционных помехозащищенных сигнальных конструкций . . . . . 669

### ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

- Головинов Е. Э., Аминев Д. А., Романова И. И.** Алгоритм формирования, передачи и обработки мониторинговой информации от дождевальная машины на основе геоинформационных систем . . . . . 677
- Цветков В. Я.** Сходимость линейных пространственных задач . . . . . 681

### БАЗЫ ДАННЫХ

- Аскерова Б. Г.** Метод оптимальной энтропийной кластеризации на базе нового определения интересности атрибута состояния элементов сообщения. Часть 1. теоретическое обоснование . . . . . 687

### ПРИКЛАДНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

- Басов И. В., Грушев С. В., Карпенко А. П., Шайтан К. В., Шуров Д. Л.** Метод построения и кластерного анализа карт вероятности заселенности конформаций дипептидов . . . . . 690

Главный редактор:  
СТЕМПКОВСКИЙ А. Л.,  
акад. РАН, д. т. н., проф.

Зам. главного редактора:  
ИВАННИКОВ А. Д., д. т. н., проф.  
ФИЛИМОНОВ Н. Б., д. т. н., с.н.с.

Редакционный совет:  
БЫЧКОВ И. В., акад. РАН, д. т. н.  
ЖУРАВЛЕВ Ю. И.,  
акад. РАН, д. ф.-м. н., проф.  
КУЛЕШОВ А. П.,  
акад. РАН, д. т. н., проф.  
ПОПКОВ Ю. С.,  
акад. РАН, д. т. н., проф.  
РУСАКОВ С. Г.,  
чл.-корр. РАН, д. т. н., проф.  
РЯБОВ Г. Г.,  
чл.-корр. РАН, д. т. н., проф.  
СОЙФЕР В. А.,  
акад. РАН, д. т. н., проф.  
СОКОЛОВ И. А., акад.  
РАН, д. т. н., проф.  
СУЕТИН Н. В., д. ф.-м. н., проф.  
ЧАПЛЫГИН Ю. А.,  
акад. РАН, д. т. н., проф.  
ШАХНОВ В. А.,  
чл.-корр. РАН, д. т. н., проф.  
ШОКИН Ю. И.,  
акад. РАН, д. т. н., проф.  
ЮСУПОВ Р. М.,  
чл.-корр. РАН, д. т. н., проф.

Редакционная коллегия:  
АВДОШИН С. М., к. т. н., доц.  
АНТОНОВ Б. И.  
БАРСКИЙ А. Б., д. т. н., проф.  
ВАСЕНИН В. А., д. ф.-м. н., проф.  
ВИШНЕКОВ А. В., д. т. н., проф.  
ДИМИТРИЕНКО Ю. И., д. ф.-м. н., проф.  
ДОМРАЧЕВ В. Г., д. т. н., проф.  
ЗАБОРОВСКИЙ В. С., д. т. н., проф.  
ЗАГИДУЛЛИН Р. Ш., к. т. н., доц.  
ЗАРУБИН В. С., д. т. н., проф.  
КАРПЕНКО А. П., д. ф.-м. н., проф.  
КОЛИН К. К., д. т. н., проф.  
КУЛАГИН В. П., д. т. н., проф.  
КУРЕЙЧИК В. В., д. т. н., проф.  
ЛЬВОВИЧ Я. Е., д. т. н., проф.  
МАРТЫНОВ В. В., д. т. н., проф.  
МИХАЙЛОВ Б. М., д. т. н., проф.  
НЕЧАЕВ В. В., к. т. н., проф.  
ПОЛЕЩУК О. М., д. т. н., проф.  
САКСОНОВ Е. А., д. т. н., проф.  
СОКОЛОВ Б. В., д. т. н., проф.  
ТИМОНИНА Е. Е., д. т. н., проф.  
УСКОВ В. Л., к. т. н. (США)  
ФОМИЧЕВ В. А., д. т. н., проф.  
ШИЛОВ В. В., к. т. н., доц.

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

Информация о журнале доступна по сети Internet по адресу <http://novtex.ru/IT>.  
Журнал включен в систему Российского индекса научного цитирования и базу данных RSCI на платформе Web of Science.  
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.

# INFORMATION TECHNOLOGIES

# ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Vol. 23  
2017  
No. 9

THEORETICAL AND APPLIED SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

Published since November 1995

ISSN 1684-6400

## CONTENTS

### INTELLIGENT SYSTEMS AND TECHNOLOGIES

- Vishnekov A. V., Ivanova E. M.** The Methods Application of Decision Support in Constructing Access Networks . . . . . 627
- Sorokin A. B., Smoljaninova V. A.** Conceptual Design of Expert Systems of Support of Decision . . . . . 634
- Kolyada A. A.** Generalized Integrated Characteristic Base of Modular Number System . 641

### MODELING AND OPTIMIZATION

- Prilutskii M. Kh., Vlasov V. S., Krivosheev O. V.** Optimal Scheduling Problems as Resources Distribution in Network Canonical Structures Problems . . . . . 650

### DIGITAL PROCESSING OF SIGNALS AND IMAGES

- Filippov B. I.** Transmission of Telemetry Information in a Hydroacoustic Communication Channels . . . . . 658
- Terekhin A. V.** The Approach to the Classification of Projections of Three-Dimensional Objects . . . . . 663

### CRYPTOSAFETY INFORMATION

- Dvornikov S. V., Pshenichnicov A. V., Manaenko S. S., Dvornikov S. S.** A Method of Forming Multiposition Jamproof Signal Constructions . . . . . 669

### GEOINFORMATION SYSTEMS

- Golovinov E. E., Aminev D. A., Romanova I. I.** The Algorithm for Generating, Transmitting, and Processing of Monitoring Information from a Sprinkler on the Basis of Geographic Information Systems . . . . . 677
- Tsvetkov V. Ya.** Convergence of Linear Spatial Tasks . . . . . 681

### DATABASE

- Askerova B. H.** Method of Optimum Entropy Clustering on the Basis of New Determination of Interestness of the Attribute of Elements of Data. Part I . . . . . 687

### APPLIED INFORMATION TECHNOLOGIES

- Basov I. V., Groshev S. V., Karpenko A. P., Shaitan K. V., Shurov D. L.** Method for Construction and Cluster Analysis of Conformational Occupancy Density Maps of Di-peptides . . . . . 690

#### Editor-in-Chief:

Stempkovsky A. L., Member of RAS,  
Dr. Sci. (Tech.), Prof.

#### Deputy Editor-in-Chief:

Ivannikov A. D., Dr. Sci. (Tech.), Prof.  
Filimonov N. B., Dr. Sci. (Tech.), Prof.

#### Chairman:

Bychkov I. V., Member of RAS,  
Dr. Sci. (Tech.), Prof.  
Zhuravljov Yu. I., Member of RAS,  
Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.  
Kuleshov A. P., Member of RAS,  
Dr. Sci. (Tech.), Prof.  
Popkov Yu. S., Member of RAS,  
Dr. Sci. (Tech.), Prof.  
Rusakov S. G., Corresp. Member of RAS,  
Dr. Sci. (Tech.), Prof.  
Ryabov G. G., Corresp. Member of RAS,  
Dr. Sci. (Tech.), Prof.  
Soifer V. A., Member of RAS,  
Dr. Sci. (Tech.), Prof.  
Sokolov I. A., Member of RAS,  
Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.  
Suetin N. V.,  
Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.  
Chaplygin Yu. A., Member of RAS,  
Dr. Sci. (Tech.), Prof.  
Shakhnov V. A., Corresp. Member of RAS,  
Dr. Sci. (Tech.), Prof.  
Shokin Yu. I., Member of RAS,  
Dr. Sci. (Tech.), Prof.  
Yusupov R. M., Corresp. Member of RAS,  
Dr. Sci. (Tech.), Prof.

#### Editorial Board Members:

Avdoshin S. M., Cand. Sci. (Tech.), Ass. Prof.  
Antonov B. I.  
Barsky A. B., Dr. Sci. (Tech.), Prof.  
Vasenin V. A., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.  
Vishnekov A. V., Dr. Sci. (Tech.), Prof.  
Dimitrienko Yu. I., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.  
Domrachev V. G., Dr. Sci. (Tech.), Prof.  
Zaborovsky V. S., Dr. Sci. (Tech.), Prof.  
Zagidullin R. Sh., Cand. Sci. (Tech.), Ass. Prof.  
Zarubin V. S., Dr. Sci. (Tech.), Prof.  
Karpenko A. P., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.  
Kolin K. K., Dr. Sci. (Tech.)  
Kulagin V. P., Dr. Sci. (Tech.), Prof.  
Kureichik V. V., Dr. Sci. (Tech.), Prof.  
Ljvovich Ya. E., Dr. Sci. (Tech.), Prof.  
Martynov V. V., Dr. Sci. (Tech.), Prof.  
Mikhailov B. M., Dr. Sci. (Tech.), Prof.  
Nechaev V. V., Cand. Sci. (Tech.), Ass. Prof.  
Poleschuk O. M., Dr. Sci. (Tech.), Prof.  
Saksonov E. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof.  
Sokolov B. V., Dr. Sci. (Tech.)  
Timonina E. E., Dr. Sci. (Tech.), Prof.  
Uskov V. L. (USA), Dr. Sci. (Tech.)  
Fomichev V. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof.  
Shilov V. V., Cand. Sci. (Tech.), Ass. Prof.

#### Editors:

Bezmenova M. Yu.  
Grigorin-Ryabova E. V.  
Lysenko A. V.  
Chugunova A. V.

Complete Internet version of the journal at site: <http://novtex.ru/IT>.

According to the decision of the Higher Certifying Commission of the Ministry of Education of Russian Federation, the journal is inscribed in "The List of the Leading Scientific Journals and Editions wherein Main Scientific Results of Theses for Doctor's or Candidate's Degrees Should Be Published"

# ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ INTELLIGENT SYSTEMS AND TECHNOLOGIES

УДК 51-74

**А. В. Вишнеков**, д-р техн. наук, проф., e-mail: avishnekov@hse.ru,

**Е. М. Иванова**, канд. техн. наук, доц., e-mail: emivanova@hse.ru,

Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики", Москва

## Применение методов поддержки принятия решений при построении сетей доступа

*Описаны этапы процесса принятия решения при выборе проекта компьютерной сети, предлагается математический аппарат для оценки проектных решений и выбора сетевого оборудования. Рассматриваются вопросы выбора наиболее предпочтительной компании-интегратора с учетом оценки предлагаемого ей проектного решения, используемых типов оборудования, его производителей и поставщиков, а также результатов защиты проекта на предприятии (презентации).*

**Ключевые слова:** проект, сети доступа, принятия решений, альтернативное проектное решение, критерии оценки

### Введение

С учетом высокой сложности задачи выбор наиболее рационального проекта корпоративной сети является трудно формализуемым процессом. Этот факт объясняет отсутствие в настоящее время универсальных методик оценки предлагаемых компаниями-интеграторами проектов корпоративных сетей. В большинстве случаев сетевые интеграторы при проектировании опираются на свой опыт и используют собственные методики проектирования. Тем не менее, наиболее часто используемый подход для выбора наиболее приемлемого интегратора и, следовательно, предлагаемого им проекта сети основан на комплексном анализе трех составляющих: информации о компании-интеграторе, информации о типах используемого оборудования, его производителях и поставщиках, а также результатах презентации проекта компанией-интегратором [1].

Задача оценки и выбора компании-интегратора и предлагаемого ею проекта сети представляет собой достаточно сложную многокритериальную задачу, причем критерии оценки могут носить противоречивый характер. Методика оценки и принятия базового проектного решения, реализация которой рассматривается на примере выбора проектного решения компьютерной сети на основе комплексного рассмотрения критериев оценки компании-интегратора, предлагаемых типов оборудования и результатов презентации проекта перед специалистами различных служб предприятия-заказчика. Данная задача может быть отнесена к классу задач принятия решений — задач оценки и сравнения многокритериальных альтернатив.

### Современные стратегии выбора сетевого проекта

Современная практика выполнения сетевых проектов на крупных предприятиях основана на изучении предложений компаний-интеграторов по реализации проекта заказчика на требуемом профессиональном уровне [1].

На первом этапе формируется ранжированный список интеграторов, удовлетворяющих требованиям заказчика (заданным ограничениям) по следующим критериям:

- стоимость решения;
- опыт реализации проектов подобного уровня;
- отзывы реальных клиентов (основные вопросы взаимодействия с подрядчиком, возникающие в процессе проекта);
- технология ведения проектов;
- проработанность предложения;
- типы оборудования, на которых базируется решение, надежность, производительность, эргономичность, безопасность;
- готовность подрядчика к полному циклу реализации проекта — от предпроектного обследования до внедрения с обязательным этапом опытной эксплуатации;
- предложение по гарантийному и послегарантийному обслуживанию.

На втором этапе проводятся оценка и ранжирование предлагаемых интеграторами аппаратных решений (списка предлагаемого ими для реализации проекта оборудования) и компаний производителей/поставщиков данного оборудования по заданным заказчиком критериям. К таким критериям можно, например, отнести следующее [1—4]:

- подтверждение официального статуса дилера;
- наличие у дилера склада оборудования;

- наличие сертифицированного сервиса;
- наличие обученных и сертифицированных сервисных инженеров;
- уровень стандартизации оборудования и его совместимость с наиболее распространенными программными средствами;
- скорость передачи информации и возможность ее дальнейшего увеличения;
- возможные топологии сети и их комбинации (шина, звезда, дерево);
- метод управления обменом в сети (CSMA/CD, полный дуплекс или маркерный метод);
- типы кабеля сети, его максимальная длина, защищенность от помех;
- стоимость и технические характеристики конкретных аппаратных средств (сетевых адаптеров, трансиверов, репитеров, концентраторов, коммутаторов);
- экономичность;
- производительность;
- масштабируемость;
- простота управления и эксплуатации;
- гибкость и удобство;
- надежность и отказоустойчивость;
- гарантийное обслуживание;
- варианты исполнения и интерфейсы;
- интеграция и маршрутизация сетей;
- безопасность и производительность брандмауэра;
- поддержка VPN для дистанционных служб Internet;
- тип системы управления устройствами и мониторинг.

Данный список может изменяться в зависимости от конкретного проекта.

На третьем этапе проводится защита презентаций предлагаемых интеграторами решений перед IT-службой компании-заказчика и представителями других ее подразделений.

Целью использования методов поддержки принятия решений является обеспечение процесса наиболее рационального выбора компании-интегратора, типов оборудования и компаний-производителей/поставщиков данного оборудования, а также выбор на заключительном этапе базового проекта сети доступа с учетом всего комплекса критериев.

#### **Методика принятия решения по выбору сетевого оборудования**

Рассмотрев все три этапа решения задачи, можно увидеть, что на первом этапе — формирование списка интеграторов, их оценка и ранжирование по заданным критериям — для сужения числа альтернатив будет эффективным применение методов, основанных на информации о допустимых значениях критериев. В частности, целесообразно использовать метод разложения множества вариантов на удовлетворительные и неудовлетворительные [5] или метод лексикографического упорядочения и полуупорядочения [6]. При использовании метода разложения множества вариантов на

удовлетворительные и неудовлетворительные отбор альтернатив осуществляется на основе задания минимально (максимально) допустимых значений критериев. Согласно методу лексикографического упорядочения лицо, принимающее решение (ЛПР), упорядочивает критерии отбора по степени их важности, а затем выполняет сужение множества альтернативных вариантов, последовательно исключая из дальнейшего рассмотрения альтернативы, не удовлетворяющие сначала наиболее важному критерию, а затем поочередно рассматривая все менее важные критерии. Отличительная особенность метода лексикографического полуупорядочения состоит в отборе альтернатив, субоптимальных по каждому критерию (т.е. задается интервал допустимых значений по критерию).

На втором этапе — формирование списка оборудования для реализации проекта и ранжирование типов оборудования по степени предпочтительности — можно применить ту же методику, но по другим критериям. Результатом второго этапа будет отказ от использования оборудования какого-либо поставщика/дилера (возможно нескольких) и, как следствие, отказ от предложившего его интегратора (нескольких интеграторов), а также оценка степени предпочтительности оборудования, прошедшего предварительный отбор.

Метод разложения множества вариантов на удовлетворительные и неудовлетворительные заключается в назначении порогового значения каждого из рассматриваемых параметров/ограничений (максимального или минимального) или задании интервала допустимых значений параметра. Из списка исключаются все альтернативы (интеграторы), параметры которых не удовлетворяют заданным ограничениям.

На третьем этапе проводится оценка презентаций проектов представителями компании и выбор наиболее рационального проектного решения с этой точки зрения.

После проведения трех этапов решения задачи осуществляется комплексная оценка проектов по трем составляющим (интегратор — оборудование — проект/презентация) и выбор ЛПР одного наиболее приемлемого проектного решения и, как следствие, предложившей его компании интегратора.

Для комплексной оценки проектов целесообразно использовать метод аналитических иерархий [7]. Для комплексной оценки всех составляющих альтернативного решения можно использовать процедуру аналитических иерархий (если решение принимается назначенным специалистом индивидуально) или метод предпочтений [8] (если решение принимается группой экспертов коллегиально).

Использование метода аналитических иерархий оправдано, так как данный метод требует от ЛПР выполнения допустимых по сложности процедур с точки зрения результатов психологических исследований. Применение данного метода целесооб-

разно, если число критериев и альтернатив в задаче невелико ( $\leq 10$ ), так как в этом случае вероятность получения несогласованных матриц попарного сравнения критериев и альтернатив мала [7]. Задача выбора проекта компьютерной сети отвечает этим требованиям, поскольку число одновременно сравниваемых критериев может быть уменьшено за счет их разделения на подгруппы: критерии оценки компании интегратора, критерии выбора оборудования и критерии общей оценки проекта (его презентации). Число альтернатив, как правило, не превышает десяти после процедуры предварительного отбора компаний-интеграторов и поставщиков/производителей сетевого оборудования на первом и втором этапах решения задачи с использованием приведенных выше методов. В случае коллективного принятия решения по выделенным подгруппам критериев в методе аналитических иерархий целесообразно совместное применение метода предпочтений и метода перестановок, так как это позволяет легко выявить несогласованные оценки экспертов и при необходимости повторить процедуру выставления оценок экспертами.

С точки зрения постановки задачи принятия решений необходимо определить альтернативные решения, критерии оценки альтернативных решений, наиболее подходящие заказчику, и ограничения на значения параметров сравниваемых решений.

Как уже было отмечено выше, итоговое решение принимается по трем составляющим: оценке интегратора, оценке оборудования и его поставщика/производителя, общей оценке предлагаемого проекта (презентации). Тогда альтернативами в рассматриваемой задаче будут являться связанные наборы "интегратор — оборудование — проект".

В качестве критериев выбора альтернатив можно использовать комбинации перечисленных выше критериев оценки интегратора, оборудования, поставщика/производителя, проекта (презентации).

Для сужения списка рассматриваемых альтернатив могут быть заданы определенные значения на шкалах используемых критериев, например, ограничение по итоговой стоимости предлагаемого интегратором решения или наличие определенного опыта выполнения подобных проектов (число завершенных проектов).

Для каждого из трех составляющих набора решение принимается согласно определенному методу поддержки принятия решения. По первой составляющей — выбор интегратора — решение может приниматься индивидуально ЛПР по проекту от заказчика либо группой экспертов (сотрудников ИТ-службы предприятия). По второй составляющей — выбор оборудования — не требуется коллегиального решения, так как критерии и ограничения четко определены, и ЛПР может самостоятельно оценить эту составляющую на основе методов поддержки принятия решений. Оценка проекта (презентации) проводится коллегиально ИТ-службой

предприятия, что требует применения групповых методов поддержки принятия решений (принятие решений в малых группах) [9].

Таким образом, для выбора наиболее рационального проектного решения для сети доступа необходима комбинация методов поддержки принятия решений, а именно: метода аналитических иерархий (базовый метод, обеспечивающий комплексную оценку проекта с учетом всех составляющих), метода предпочтений (обобщенная оценка проекта группой экспертов по заданной подгруппе критериев в случае необходимости принятия коллективного решения) и метода перестановок (оценка экспертом проектных решений с учетом их ранжирования по каждому критерию из подгруппы отдельно).

### Пример задачи принятия решения

Допустим, в конкурсе на разработку проекта сети доступа приняли участие пять компаний-интеграторов: И1, И2, И3, И4, И5, которые оцениваются заказчиком по параметрам, приведенным в табл. 1.

Каждая компания-заказчик может использовать собственный перечень параметров и задавать свои шкалы измерения значений параметров, а также список и допустимые значения параметров (ограничений). Допустим, что для предварительного отбора интеграторов используются следующие ограничения:

- стоимость проекта не более 1 000 000 руб.;
- опыт выполнения (число) подобных проектов — не менее 5;
- проработанность проекта — удовлетворительная;
- срок гарантийного сопровождения проекта — не менее 1 года.

Согласно введенным ограничениям из первичного списка были исключены альтернативы И3 и И6.

Пусть для очередного этапа отбора компаний-интеграторов (предлагаемого ими оборудования) заказчиком используются следующие важные для него ограничения:

- обязательное подтверждение официального статуса дилера;

Таблица 1

Оценки компаний-интеграторов

Параметр	Интегратор					
	И1	И2	И3	И4	И5	И6
Стоимость проекта, тыс. руб.	1000	500	1200	1000	450	700
Опыт (число) выполнения подобных проектов	11	20	16	17	17	13
Проработанность проекта	Удовл.	Хор.	Отл.	Хор.	Отл.	Хор.
Срок гарантийного сопровождения проекта, мес.	24	12	18	12	24	Нет

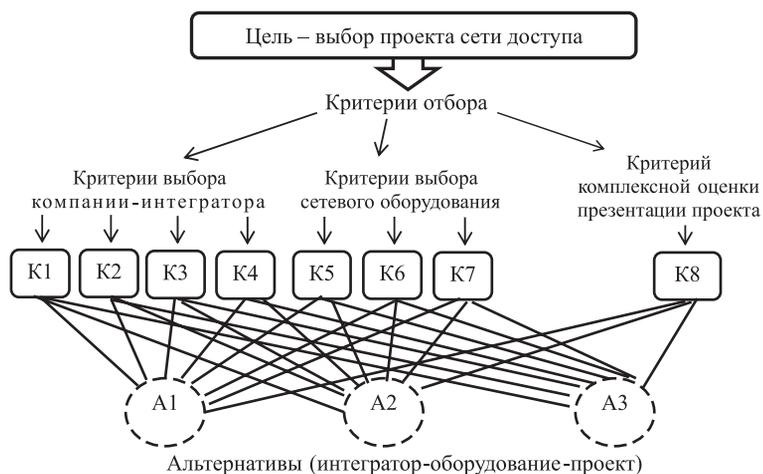


Рис. 1. Структура процесса оценивания проекта по иерархической системе критериев

- обязательное наличие склада у дилера оборудования;
- обязательное наличие сертифицированного сервиса;
- возможность увеличения скорости передачи.

Допустим, что оставшимся компаниям-интеграторам предложено использование оборудования, производители/дилеры которого имеют характеристики, приведенные в табл. 2.

Таблица 2  
Оценки производителей сетевого оборудования

Параметр	Интегратор			
	И1	И2	И4	И5
Подтверждение официального статуса дилера	Да	Нет	Да	Да
Наличие склада у дилера оборудования	Да	Да	Да	Да
Наличие сертифицированного сервиса	Да	Да	Да	Да
Возможность увеличения скорости передачи	Да	Да	Да	Да

Согласно введенным ограничениям из второго списка была исключена альтернатива И2.

Для окончательного принятия решения сформирован список альтернатив: А1 — интегратор 1, А2 — интегратор 4, А3 — интегратор 5. Также следует сформировать список критериев отбора, например, такой, как приведен на рис. 1.

#### Критерии оценки компании-интегратора

- К1. Стоимость проекта (тыс. руб.).
- К2. Опыт выполнения (число) подобных проектов.
- К3. Проработанность проекта.
- К4. Срок гарантийного сопровождения проекта.

#### Критерии оценки оборудования

К5. Возможные топологии сети и их комбинации (шина, звезда, дерево).

К6. Метод управления обменом в сети (CSMA/CD, полный дуплекс или маркерный метод).

К7. Разрешенные типы кабеля сети, его максимальная длина, защищенность от помех.

#### Критерии оценки презентации проекта

К8. Комплексная оценка презентации проекта.

Заказчик вправе сам определить список критериев отбора по своему усмотрению. Например, для оценки презентации проекта при необходимости можно использовать несколько оценочных критериев или вложенную систему критериев.

Для применения методов поддержки принятия решений важно оценить значимость каждого оценочного критерия для заказчика.

Процедура оценки может проводиться одним ответственным лицом (ЛПР) или группой экспертов. В первом случае можно применить процедуры попарного сравнения критериев (метода аналитических иерархий), во втором случае — метод ранжирования альтернатив или метод предпочтений [8]. Пример применения будет рассмотрен ниже.

Согласно методу аналитических иерархий процедура сравнения и расчета весов критериев заключается в выставлении сравнительных оценок  $x_{ij}$  каждой паре критериев  $K_i - K_j$  по следующему правилу.

Оценка  $x_{ij} = 1$  выставляется обоим критериям, если они имеют равную важность для рассматриваемого проекта. Оценка  $x_{ij} = 3$  выставляется критерию  $K_i$ , если его важность для рассматриваемого проекта незначительно превосходит важность критерия  $K_j$  (тогда критерию  $K_j$  выставляется оценка  $x_{ji} = 1/3$ ). При существенном превосходстве критерию  $K_i$  выставляется оценка  $x_{ij} = 5$  (критерию  $K_j - x_{ji} = 1/5$  соответственно). При значительном превосходстве критерию  $K_i$  выставляется оценка  $x_{ij} = 7$  (критерию  $K_j - x_{ji} = 1/7$  соответственно). При очень большом превосходстве критерию  $K_i$  выставляется оценка  $x_{ij} = 9$  (критерию  $K_j - x_{ji} = 1/9$  соответственно).

Допустим, была получена следующая матрица  $X$  оценок  $x_{ij}$  попарного сравнения критериев:

$$X = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 7 & 1/5 & 1/3 & 3 & 5 & 5 & 7 \end{matrix} & \begin{matrix} \sqrt[n]{\prod_j x_{ij}} \\ 1,99 \\ 0,21 \\ 4,83 \\ 4,21 \\ 1,28 \\ 0,50 \\ 0,78 \\ 0,32 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1/7 & 1 & 1/9 & 1/9 & 1/7 & 1/5 & 1/5 & 1/3 \\ 5 & 9 & 1 & 3 & 5 & 7 & 7 & 9 \\ 3 & 9 & 1/3 & 1 & 5 & 7 & 5 & 7 \\ 1/3 & 7 & 1/5 & 1/5 & 1 & 5 & 3 & 5 \\ 1/5 & 5 & 1/7 & 1/7 & 1/5 & 1 & 1/3 & 5 \\ 1/5 & 5 & 1/7 & 1/5 & 1/3 & 3 & 1 & 5 \\ 1/7 & 3 & 1/9 & 1/7 & 1/5 & 1/3 & 1/5 & 1 \end{matrix} & \end{matrix}$$

Затем следует рассчитать вес  $W_i$  каждого  $i$ -го критерия по формуле

$$W_i = \frac{\sqrt[n]{\prod_j x_{ij}}}{\sum_i \sqrt[n]{\prod_j x_{ij}}},$$

где  $n$  — общее число критериев (в нашем примере  $n = 8$ );  $i, j = 1, \dots, n$ ;  $x_{ij}$  — оценка — элемент матрицы  $\mathbf{X}$  в строке  $i$  и столбце  $j$ .

В результате расчетов были получены следующие веса критериев:  $W_1 = 0,14$ ;  $W_2 = 0,01$ ;  $W_3 = 0,34$ ;  $W_4 = 0,30$ ;  $W_5 = 0,09$ ;  $W_6 = 0,04$ ;  $W_7 = 0,06$ ;  $W_8 = 0,02$ .

Далее переходим к взаимной оценке альтернатив по критериям К1...К8. Для этого по аналогии с матрицей  $\mathbf{X}$  оценок  $x_{ij}$  составляем  $n$  матриц ( $\mathbf{Y}^1 \dots \mathbf{Y}^8$ ) размерности  $m \times m$  сравнительной оценки  $m$  альтернатив по каждому критерию. В нашем примере сравнивается три альтернативы ( $m = 3$ ): А1 — интегратор 1, А2 — интегратор 4, А3 — интегратор 5. В матрице каждый элемент  $y_{ij}^k$  показывает оценку альтернативы А $_i$  по отношению к альтернативе А $_j$  по критерию  $k$  с использованием тех же правил сравнения (равнозначна — 1, незначительное превосходство — 3, существенное превосходство — 5, и т. д.). Матрицы попарного сравнения альтернатив имеют вид

$$\mathbf{Y}^1 = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1/7 \\ 1 & 1 & 1/7 \\ 7 & 7 & 1 \end{vmatrix}; \mathbf{Y}^2 = \begin{vmatrix} 1 & 1/3 & 1/3 \\ 3 & 1 & 1 \\ 3 & 1 & 1 \end{vmatrix}; \mathbf{Y}^3 = \begin{vmatrix} 1 & 1/3 & 1/5 \\ 3 & 1 & 1/3 \\ 5 & 3 & 1 \end{vmatrix};$$

$$\mathbf{Y}^4 = \begin{vmatrix} 1 & 7 & 1 \\ 1/7 & 1 & 1/7 \\ 1 & 7 & 1 \end{vmatrix}; \mathbf{Y}^5 = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}; \mathbf{Y}^6 = \begin{vmatrix} 1 & 3 & 5 \\ 1/3 & 1 & 3 \\ 1/5 & 1/3 & 1 \end{vmatrix};$$

$$\mathbf{Y}^7 = \begin{vmatrix} 1 & 1/7 & 1/3 \\ 7 & 1 & 1/5 \\ 3 & 5 & 1 \end{vmatrix}; \mathbf{Y}^8 = \begin{vmatrix} 1 & 5 & 3 \\ 1/5 & 1 & 3 \\ 1/3 & 1/3 & 1 \end{vmatrix}.$$

Для каждой матрицы  $\mathbf{Y}^1 \dots \mathbf{Y}^8$  рассчитывается ценность  $V_i^k$  каждой альтернативы по критерию согласно формуле

$$V_i^k = \frac{\sqrt[m]{\prod_j y_{ij}^k}}{\sum_i \sqrt[m]{\prod_j y_{ij}^k}},$$

где  $m$  — общее число альтернатив;  $i, j = 1, \dots, m$ ;  $y_{ij}^k$  — элемент матрицы  $\mathbf{Y}^k$  в строке  $i$  и столбце  $j$ .

Затем рассчитывается итоговая ценность  $U_i$  каждой альтернативы по всем критериям по формуле

$$U_i = \sum_{k=1}^n [V_i^k W_k], i = 1, \dots, m.$$

Альтернатива с наивысшей итоговой ценностью и будет искомым решением. Согласно рассмотренным в примере данным были получены следующие оценки: ценность интегратора 1 ( $U_1$ ) составила 0,27; ценность интегратора 4 ( $U_2$ ) составила 0,19; ценность интегратора 5 ( $U_3$ ) составила 0,54, откуда можно сделать вывод, что наиболее рациональным выбором с учетом заданной важности всех критериев для рассматриваемого проекта будет интегратор 5 (с максимальной ценностью).

### Пример группового принятия решений по оценке альтернативных проектов

На любом из этапов оценивания в случае, когда ЛПР затрудняется в задании относительных оценок альтернатив, может быть привлечена группа экспертов. Рассмотрим достоинства и недостатки применения различных методов поддержки группового принятия решений, так как от правильной организации работы экспертов зависит выбор наиболее рационального проектного решения.

В методе назначений и методе ранга используются или непосредственное назначение экспертами приоритетов (мест) альтернативам или задание численных оценок альтернатив по 10-балльной шкале. Данная процедура является сложной для экспертов (по результатам психологических исследований), поэтому не может быть рекомендована к использованию.

Многие компании для комплексной оценки проектов используют схожие подходы, основанные на непосредственном выставлении экспертами балльных оценок проектам и их суммированием с учетом коэффициентов значимости заданных компанией критериев [1]. Эти подходы также имеют перечисленные выше недостатки. Исходя из этого для принятия решения по общей оценке проекта (презентации) целесообразно использовать метод ранжирования альтернатив.

Метод ранжирования альтернатив построен на основе процедуры попарного сравнения альтернатив, которая является допустимой по сложности для человека, т. е. при выполнении данной процедуры эксперт, как правило, не совершает ошибок, и она не требует от эксперта упрощения исходной информации. Данный метод основан на последовательном выполнении процедур заполнения матриц попарного сравнения альтернатив каждым экспертом и нахождении результирующей матрицы, полученной путем суммирования одноименных элементов матриц экспертов и суммирования элементов результирующей матрицы по строкам. Результи-

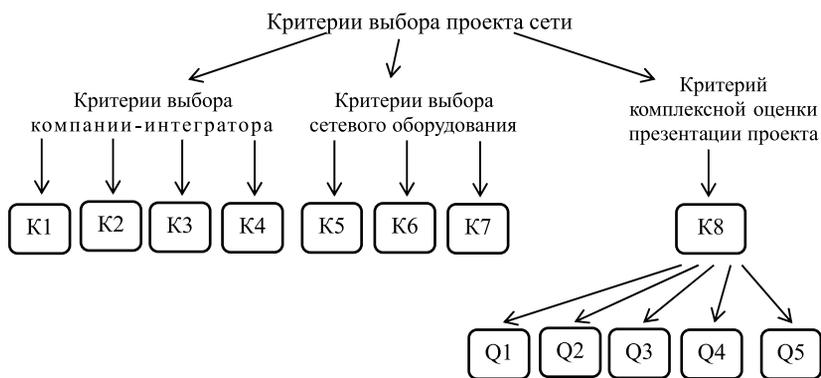


Рис. 2. Иерархия системы критериев

рующие численные значения сумм позволяют ранжировать проекты по степени предпочтительности с учетом мнений всех экспертов.

Используя этот метод, эксперты дают комплексную интегральную оценку проектам и на ее основе осуществляют попарное сравнение проектов по степени предпочтительности для компании. Однако может возникнуть необходимость детального рассмотрения экспертами качества проектов (либо их презентаций) и их дальнейшего сравнения по нескольким заданным критериям (веса которых предварительно рассчитывает ЛПР на основе процедуры метода аналитических иерархий). Тогда эксперт может получить результат попарного сравнения альтернатив на основе метода перестановок [6] и затем отразить его при заполнении матрицы попарного сравнения альтернатив. Метод перестановок обладает достаточной простотой и использует только допустимые для человека процедуры принятия решений.

Рассмотрим пример расчета оценки  $V_i^k$  — презентаций альтернативных проектов предлагаемых компаниями-интеграторами, если оценка выполняется группой экспертов (представителями различных служб предприятия), с применением метода перестановок. Согласно методу при сравнении двух альтернатив  $A_i$  и  $A_j$  каждым  $l$ -м экспертом выставляется оценка  $z_{ij}^l = 1$ , если  $A_i$  лучше  $A_j$ ,  $z_{ij}^l = -1$ , если  $A_i$  хуже  $A_j$ ,  $z_{ij}^l = 0$ , если  $A_i$  и  $A_j$  равнозначны, и всегда  $z_{ij}^l = -z_{ji}^l$ . Например, для сравнения трех ( $m = 3$ ) альтернатив между собой эксперт может составить матрицу

$$Z^{\Delta l} = \begin{vmatrix} 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & -1 \\ 1 & 1 & 0 \end{vmatrix}.$$

Однако существует вероятность, что для комплексной оценки проекта (презентации) использу-

ется несколько критериев (рис. 2), тогда экспертам будет сложно оценить альтернативы и заполнить матрицы  $Z^{\Delta l}$ .

В этом случае можно воспользоваться методом перестановок, в котором из двух альтернатив лучшей признается та, для которой выполняется условие

$$\Delta_{ij} = (d_{ij} - c_{ij}) > 0,$$

где  $d_{ij} = \sum W_k$  — сумма весов критериев, по которым альтернатива  $A_i$  лучше альтернативы  $A_j$ ;  $c_{ij} = \sum W_k$  — сумма весов критериев, по которым альтернатива  $A_i$  хуже альтернативы  $A_j$ .

Рассмотрим пример оценивания презентации проекта по следующим критериям:

Q1. Возможность интеграции информационной системы предприятия с сетевым проектом (вес  $W_1 = 0,3$ ).

Q2. Приемлемость сроков окончания отдельных этапов внедрения проекта (вес  $W_2 = 0,1$ ).

Q3. Степень влияния результатов внедрения проекта на эффективность работы подразделений (вес  $W_3 = 0,2$ ).

Q4. Учет в проекте возможности дальнейшего развития предприятия заказчика (вес  $W_4 = 0,1$ ).

Q5. Ясность и четкость изложения основных идей и ответов на заданные вопросы при защите проекта (вес  $W_5 = 0,3$ ).

Согласно методу перестановок эксперту предлагается попарно оценить две презентации (альтернативы) по каждому критерию, расставив первичные оценки по правилу: лучше, равнозначна, хуже (табл. 3). В этом случае эксперт должен выставить оценку  $z_{12}^l = 1$  и  $z_{21}^l = -1$ .

Допустим, что на момент заслушивания презентации из списка интеграторов уже были исключены несколько кандидатов и остались три ( $m = 3$ ) претендента:  $A_1$  = Интегратор 1,  $A_2$  = Интегратор 4,  $A_3$  = Интегратор 5. Допустим также, что в оценке участвуют четыре эксперта ( $l = 1, \dots, 4$ ) (см. пример

Таблица 3  
Экспертная оценка двух альтернатив  $A_1$  и  $A_2$  по пяти критериям

Критерии (вес)	Презентации			
	$A_1$	$A_2$	$d_{ij}$	$c_{ij}$
Q1 (вес $W_1 = 0,3$ )	Лучше	Хуже	+	
Q2 (вес $W_2 = 0,1$ )	Равнозначны	Равнозначны		
Q3 (вес $W_3 = 0,2$ )	Лучше	Хуже		
Q4 (вес $W_4 = 0,1$ )	Хуже	Лучше	+	
Q5 (вес $W_5 = 0,3$ )	Хуже	Лучше		
$\Delta_{ij} = (0,5 - 0,4) > 0$			0,5	0,4

выше). Тогда матрицы попарного сравнения альтернатив экспертами Э1...Э4 будут иметь вид

$$\begin{array}{c}
 \mathbf{Z}^{\text{Э1}} \quad \mathbf{Z}^{\text{Э2}} \quad \mathbf{Z}^{\text{Э3}} \quad \mathbf{Z}^{\text{Э4}} \quad \mathbf{Z} \quad \Sigma \\
 \left| \begin{array}{ccc} 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & -1 \\ 1 & 1 & 0 \end{array} \right| \quad \left| \begin{array}{ccc} 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & -1 \\ 1 & 1 & 0 \end{array} \right| \quad \left| \begin{array}{ccc} 0 & 1 & 1 \\ -1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \end{array} \right| \quad \left| \begin{array}{ccc} 0 & -1 & -1 \\ 1 & 0 & 1 \\ -1 & -1 & 0 \end{array} \right| \quad \left| \begin{array}{ccc} 0 & 2 & -2 \\ -2 & 0 & -2 \\ 2 & 2 & 0 \end{array} \right| \quad \left| \begin{array}{c} 0 \\ -4 \\ 4 \end{array} \right|
 \end{array}$$

Когда экспертами заполнены матрицы попарного сравнения альтернатив, вычисляется результирующая матрица  $\mathbf{Z}$ , полученная путем суммирования одноименных элементов всех матриц экспертов. Далее необходимо просуммировать элементы результирующей матрицы  $\mathbf{Z}$  по строкам ( $\Sigma$ ). Очевидно, что по результатам сравнения предпочтение следует отдать альтернативе А3 (Интегратора 5) с наивысшей результирующей оценкой.

### Заключение

В статье предложена методика оценки и выбора проекта компьютерной сети из предлагаемых компаниями-интеграторами проектов на основе применения методов поддержки принятия решений. Данная методика основана на последовательном выполнении процедур оценки и сравнения проектов на основе расчета критериев оценки альтернативных компаний-интеграторов, вариантов предлагаемого ими оборудования, его производителей и поставщиков, а также сделанных ими презентаций проекта. Использование данной методики позволяет провести обоснованный выбор наиболее рационального проектного решения с учетом мнений

как ЛПП (руководителя проекта), так и экспертов (инженеров разработчиков, административных работников, специалистов по оценке стоимостных параметров проекта и др.).

Предлагаемая методика позволяет повысить прозрачность и обоснованность выбора компании-интегратора и предлагаемого ею проекта.

### Список литературы

1. Телегин К. Е. Принципы выбора оборудования для построения сетей доступа // Технологии и средства связи. 2007. № 3. С. 30—31. URL: <http://www.tssonline.ru/articles2/multiplay/principy-vybora-oborud-dlya-postroen-setey-dostupa> (дата обращения: 25.01.2017).
2. Сайт компании Tracklab. Раздел "Сетевое оборудование: основные критерии выбора для проводной локальной сети", URL: [http://tracklab.ru/catalog/sozдание\\_setey/ViborOborudovania-Setey/189](http://tracklab.ru/catalog/sozдание_setey/ViborOborudovania-Setey/189) (дата обращения: 22.01.2017).
3. Сайт компании сетевого системного интегратора "ИМПУЛЬС-ИВЦ". Раздел "Активное сетевое оборудование", URL: <http://www.impuls-ivc.ru/products/compsys/network> (дата обращения: 22.01.2017).
4. Рессель Торстен. Критерии выбора маршрутизатора // Журнал сетевых решений / LAN. 2009. № 02. URL: <http://www.osp.ru/lan/2009/02/7156015> (дата обращения: 25.01.2017).
5. Трахтенгерц Э. А. Компьютерная поддержка принятия решений. Научно-практическое издание. М.: СИНТЕГ, 1998. 376 с.
6. Эддоус М., Стэнсфилд Р. Методы принятия решений: Пер. с англ. / Под ред. И. И. Елисеевой. М.: Аудит, ЮНИТИ, 1997.
7. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий: Пер. с англ. / Под ред. Р. П. Ваचनाдзе. М.: Радио и связь, 1993.
8. Лобанов А. А. Метод предпочтений как инструмент поддержки принятия решений // Перспективы науки и образования, 2015. № 2 (14). С. 36—43.
9. Ларичев О. И. Теория и методы принятия решений, а также Хроника событий в Волшебных странах: Учебник. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Логос, 2002. 392 с.

A. V. Vishnekov, Professor, e-mail: avishnekov@hse.ru,

E. M. Ivanova, Associate Professor, e-mail: emivanova@hse.ru,

National Research University "Higher School of Economics" (NRU HSE)

## The Methods Application of Decision Support in Constructing Access Networks

*The article deals with the stages of the decision-making process when choosing a computer networks project. The authors propose a mathematical apparatus for the evaluation of project solutions and selection of network equipment. The work considers questions of selecting the most preferred company-integrator, based on it's assessment of the project solutions, network equipment, vendors, developers, and complex project presentation. It is shown that at the first stage (formation of the integrators list, their evaluation and ranking criteria) the use of methods based on information on allowable values, criteria: method of expanding the set of satisfactory and unsatisfactory or methods of lexicographic ordering and semi-ordering will be effective to reduce the of alternatives number. As the main method for evaluation and selection of alternative design decisions the decision maker proposes the use of the analytic hierarchy process.*

*The article consider the case when the decision maker can specify the relative evaluation of the alternatives, it is advisable to enlist the expert group The method of ranking alternatives is advisable to use for decision-making on integrated assessment of the project. The method of permutations is suggested for detailed consideration by experts of the projects quality offered by the integrators. The method allows project comparison on several criteria (calculation criteria weights on the basis of the procedure from the analytic hierarchy process).*

**Keywords:** project, access network, decision making, alternative project design, evaluation criteria

## References

1. **Telegin K. E.** Principy vybora oborudovaniya dlja postroeniya setej dostupa (Principles of equipment choosing for access networks building), *Tehnologii i sredstva svjazi*, 2007, no. 3, pp. 30–31. URL: <http://www.tssonline.ru/articles2/multiplay/principy-vybora-oborud-dlya-postroen-setey-dostupa> (data obrashhenija: 25.01.2017) (in Russian).
2. **Sajt kompanii Tracklab.** Razdel "Setevoe oborudovanie: osnovnye kriterii vybora dlja provodnoj lokal'noj seti", URL: [http://tracklab.ru/catalog/sozdanie\\_setey/ViborOborudovaniyaSetey/189](http://tracklab.ru/catalog/sozdanie_setey/ViborOborudovaniyaSetey/189) (data obrashhenija: 22.01.2017) (in Russian).
3. **Sajt kompanii setevogo sistemnogo integratora "IMPULS-IVC".** Razdel "Aktivnoe setevoe oborudovanie", URL: <http://www.impuls-ivc.ru/products/compsys/network> (data obrashhenija: 22.01.2017) (in Russian).
4. **Ressel Torsten.** Kriterii vybora marshrutizatora (Criteria for router choosing), *Zhurnal setevyh reshenij / LAN*, 2009, no. 02. URL: <http://www.osp.ru/lan/2009/02/7156015> (data obrashhenija: 25.01.2017) (in Russian).
5. **Trahtengerc Je. A.** *Komp'juternaja podderzhka prinjatija reshenij* (Computer Decision Support). Nauchno-prakticheskoe izdanie, Moscow: SINTEG, 1998, 376 p. (in Russian).
6. **Jeddous M., Stjensfild R.** *Metody prinjatija reshenij* (Decision making methods) / Per. s angl. pod red. chlen-korr. RAN I. I. Eliseevoj, Moscow, Audit, JuNITI, 1997. (in Russian).
7. **Saati T. L.** *Prinjatje reshenij. Metod analiza ierarhij* (Decision making with the analytic hierarchy process). Perevod s anglijskogo pod redakciej R. P. Vachnadze, Moscow, Radio i svjaz', 1993. (in Russian).
8. **Lobanov A. A.** Metod predpochtenij kak instrument podderzhki prinjatija reshenij (Preference method as a decision support tool), *Perspektivy nauki i obrazovanija*, 2015, no. 2 (14), pp. 36–43. (in Russian).
9. **Larichev O. I.** *Teorija i metody prinjatija reshenij, a takzhe Hronika sobytij v Volshebnyh stranah* (The decision-making theory and methods, and also Chronicle of events in the Magic countries): Uchebnik. Izd. 2-e, pererab. i dop. Moscow, Logos, 2002. 392 p. (in Russian).

УДК 004.023/004.825

**А. Б. Сорокин**, канд. техн. наук, доц., e-mail: [ab\\_sorokin@mail.ru](mailto:ab_sorokin@mail.ru),  
**В. А. Смольянинова**, канд. техн. наук, доц., e-mail: [valerysmol@mail.ru](mailto:valerysmol@mail.ru),  
Московский технологический университет (МИРЭА)

## Концептуальное проектирование экспертных систем поддержки принятия решений

*Предложена оригинальная методика для проектирования экспертных систем на основе концептуальной структуры акта деятельности. Для построения данной структуры разработка экспертных моделей рассмотрена с позиции системных исследований, деятельностного подхода и ситуационного анализа. Эти взаимосвязанные аспекты помогли определить базу знаний для проектирования экспертных систем, которая отображена в концептуальной структуре.*

**Ключевые слова:** *большие и сложные системы, полиструктурность, полифункциональность, акт деятельности, ситуационный анализ, концептуальная структура акта деятельности*

### Введение

Объективная реальность современного мира такова, что лица, принимающие решения (далее ЛПР), вынуждены действовать в динамически сложной среде, которая характеризуется следующими особенностями [1]:

- для достижения целей необходимо принимать множество решений, каждое из которых следует рассматривать в контексте остальных;
- принимаемые решения зависимы друг от друга, обладают стохастическими связями;
- среда изменяется как под воздействием определенной совокупности систем, так и вследствие принимаемых решений.

В динамически сложной среде находится множество систем (экономических, социальных, технологических и др.), в которых центральную роль играет логика человеческих целей и действий. При таких условиях среда определена многомерностью состава и организации, а знания о ней обладают

неструктурированностью и трудно формализуемым характером. Очевидно, что управление такой совокупностью систем должно основываться на экспертном моделировании, которое используется для решения неформализованных задач. При этом если предметная область имеет большую размерность и высокую степень развития, то создание полного списка правил весьма трудоемко. В связи с этим создаются модели предметных областей (далее ПрО) с помощью семантических сетей, фреймов, леном и ментальных карт. Однако данные концептуальные схемы при описании ПрО с большой внутренней динамикой и размерностью неудобны и даже во многих случаях неприемлемы для представления знаний.

Установление структуры какого-либо объекта во многом тождественно его познанию как таковому. Все иные аспекты во многом производны от его структурной организации и определяются ею. Концептуальная структурная характеристика любого объекта является главной при его раскрытии

и должна быть обеспечена определенным конструктором (остовом, каркасом) знаний. Поэтому наибольшее распространение получила так называемая CASE-технология (*Computer-Aided Software Engineering* — автоматизированная разработка программного обеспечения). Однако, как видно из названия, CASE-технология имеет иное предназначение.

### Постановка задачи для концептуального проектирования экспертных систем

Общеизвестно, что понятия "структура" и "система" неотделимы друг от друга. В связи с этим необходимо отметить двоякость концептуальной работы: с одной стороны, она формирует "новые" определения исходя из родовых связей между понятиями, а с другой — порождает идею проектируемой системы, выраженную через интерпретацию понятий. В данных аспектах единицей такой работы выступает концептуальная структура. Таким образом, исходя из дефиниции понятия "система" может быть выдвинута гипотеза о структуре динамически сложной среды и идее ее проектирования как "большой" системы, в которой зафиксированы различные "сложные" системы.

В результате проведенного системного исследования должно быть выявлено, что динамически сложная среда обусловлена поливариантным состоянием деятельностей — системообразующего фактора и может рассматриваться как полифункциональная и полиструктурная система [2].

Далее необходимо рассмотреть моделирование динамически сложной среды с позиции деятельностного подхода Г. П. Щедровицкого [3]. В результате модификации деятельностного подхода должно быть создано категориальное поле знаний о проблемной ситуации, которое не учитывает роль ситуативности при разрешении проблемы.

Это приводит к рассмотрению динамически сложной среды с позиции ситуационного анализа Л. С. Болотовой [4]. Выявлено, что широкий диапазон деятельностей в динамически сложной среде усложняет определение направления движения к цели (требований к результату деятельности) при описании единичных решений совокупностью концептуальных структур.

На основании выявленных недостатков обоснована возможность синтеза деятельностного подхода

и ситуационного анализа. В результате естественным образом должна быть сформирована концептуальная структура акта деятельности, которая представляет собой шаблон части деятельности и может на программном уровне использоваться для генерации баз знаний в виде продукционных правил.

### Системные исследования

Общеизвестно, что системные представления не существуют в виде строгой методологической концепции, но при этом они тесно связаны с различными направлениями современной науки. Поэтому в зависимости от того, какое определение будет взято за первооснову, зависит решение вопроса о специфических признаках исследования системного объекта.

Некоторые из определений претендуют на универсальность: система есть совокупность или множество связанных между собой элементов [5, с. 17].

Хотя практическое применение определений такого класса невелико, можно считать, что структура строится из множества элементов  $A$  и множества связей (отношений)  $\Gamma$  между ними, заполняющих пространство системы  $S$ .

Однако примитивный редукционизм, сводящий систему к сумме ее элементов, почти всегда приводит к ошибочным выводам. Поэтому предлагается рассмотреть динамически сложную среду как большую систему, т. е. систему, которая не может рассматриваться иначе как в качестве совокупности априорно выделенных подсистем [6, с. 28]. Таким образом, в пространстве системы  $S_b$  может существовать некоторая подсистема  $S_1$  с множеством элементов  $\{Aa, Ab, \dots, Ah\}$  и подобная ей подсистема  $S_2$ , состоящая из связанных друг с другом элементов  $\{Ai, Aj, \dots, Ap\}$  (рис. 1). Построенная структура является иерархической, которая включает два уровня — подсистемы низших уровней  $S_1$  и  $S_2$ , которые входят в состав структуры более высокого уровня  $S$ .

При многоуровневом расчленении большой системы необходимо определить термин понятия "подсистема" как элемент системы, который при подробном рассмотрении оказывается системой [7, с. 341]. Следовательно, подсистему можно представить как сложную систему  $S_c$  — систему, построенную для решения многоцелевой задачи; систему, отражающую разные, несравнимые аспекты характеристики объекта; систему, для описания которой необходимо несколько языков; систему, включающую взаимосвязанный комплекс разных моделей [6, с. 32].

Тогда по отношению к пространству большой и сложной системы  $S_{bc}$  в подсистемах  $S_1$  и  $S_2$  существуют структуры  $(S_1^1, S_1^2, S_1^3, S_1^4)$  и  $(S_2^1, S_2^2, S_2^3, S_2^4)$ , ко-

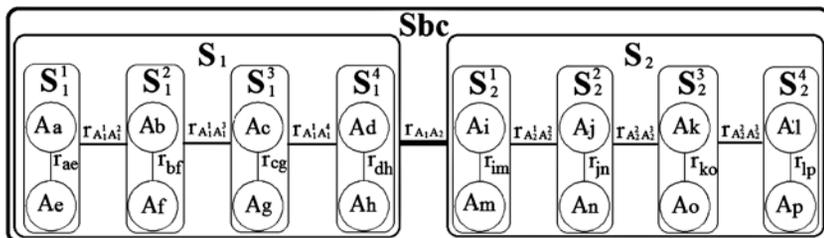


Рис. 1. Структура пространства большой и сложной системы

торые увеличивают мерность состава и сложность организации. Сложность организации обусловлена многообразием законов функционирования и сложной организацией компонентов.

На рис. 1 демонстрируется, как можно из одной и той же совокупности элементов строить различные иерархические структурные представления, образующие полиструктуру. При этом структура определяет функцию, так как при одном и том же составе элементов, но при различном взаимодействии между ними меняется функция системы и ее возможности. В то же время одна и та же функция может реализоваться различными структурами, которые находятся в различных средах. Соответственно, можно утверждать, что динамически сложная среда должна рассматриваться как большая и сложная система, которая не только полиструктурна, но и полифункциональна.

При этом сложность организации выступает как некоторая затруднительность к упорядоченности системы в соответствии с системообразующим фактором [8, с. 53]. Системообразующий фактор определен объективным явлением, характеризует способность материи обретать и проявлять системность и выступает средством (инструментом) для вычленения системы из среды. Очевидно, что главным системообразующим фактором в динамически сложной среде является активное взаимодействие человека с окружающим миром — деятельность.

### Деятельностный подход

Получить конечное определение понятия "деятельность" сложно, так как это универсальная общенаучная категория предельной абстракции и используется в форме объяснительного принципа. Свойство универсальности означает, что деятельность способна учитывать специфические особенности различных предметных областей, которые могут быть различны как по функциональному составу, так и по структуре, т. е. универсальность деятельности порождает свойства полифункциональности и полиструктурности [9, с. 242].



Рис. 2. Иерархическая структура динамически сложной среды

Свойство полиструктурности позволяет деятельности развернуться в самые разные структуры и занимать определенное пространство окружающей действительности. Таким образом, в динамически сложной среде может существовать различное число деятельностей, которые существуют в циклах воспроизводства (рис. 2).

Циклы воспроизводства разделяют деятельность на частные изображения: сферы деятельности и акты деятельности. Сферы деятельности имеют свои специфические предметные области и связаны с другими сферами фактором взаимопомощи, что в конечном счете вызывает их эволюцию. Они разбиты на элементарные единицы, которые называются актом деятельности. Любой акт деятельности всегда выполняется конкретным субъектом (группой субъектов) в соответствии с функциональными особенностями, имеет временные и пространственные ограничения, заканчивается созданием продукта деятельности. Таким образом, на основании релевантности рис. 1 и рис. 2 можно утверждать, что деятельность не противоречит проведенным системным исследованиям. С позиций системного подхода деятельность определена как сложное, многоуровневое, многомерное и развивающееся явление и представляет собой сложную динамическую систему, имеющую свое строение, свои внутренние переходы и свое развитие [10, с. 47].

Деятельность существует в двух формах: внутренняя — мыслительная, невидимая для наблюдателя, как выражение активности сознания, и внешняя — практическая, видимая для наблюдателя, как конечный результат, достижимый в пределах некоторого интервала времени. В статье рассматривается только внешняя деятельность, которая может быть выражена в реальном продукте. Внешняя деятельность строится в соответствии с определенными нормами (правилами), без которых она не существует. Эти правила представляют интерес, когда используются многократно при построении других деятельностей, при этом можно выделить обобщающие нормы, которые будут представлять некий шаблон. Для построения схемы акта деятельности целесообразно рассмотреть "...совсем абстрактные, собственно методические представления деятельности в виде набора блоков" [3, с. 243]. Шаблон акта деятельности должен представлять собой категориальную схему акта деятельности, каждый элемент которой может "разворачиваться" в выбранном направлении деятельности (рис. 3).

Элементы в категориальной схеме акта деятельности (рис. 3) представлены в виде различных процессов (множество действий), трансформаций (исходного материала в продукт),



Каждое горизонтальное отношение или вертикальное взаимодействие вследствие виртуальной или реальной связанности приводит к активности взаимосвязанных элементов, т. е. изменению их свойств. При этом элементы, вступая в структурную связь через действие, утрачивают часть своих свойств, которыми они потенциально обладали в свободном состоянии. Поэтому необходимо учитывать структурную связь между элементами и их свойствами Р, которая представлена через связующие звенья Lp. Свойства имеют строковые, логические или числовые значения [5, с. 333].

Все элементы структуры единичного решения  $d_i$  обладают набором свойств  $\{Pas_1...Pas_N\}$ ,  $\{Pao_1...Pao_N\}$  и  $\{Pac_{11}...Pac_{1N}\}$ ,  $\{Pac_{21}...Pac_{2N}\}... \{Pac_{N1}...Pac_{NN}\}$ , образующих множество ее концептов —  $C(d_i)$ . Соответственно между свойствами могут существовать свои отношения — соотношения  $Rp\{Pac_{11}...Pac_{1N}\}$  и  $\{Pao_1...Pao_N\}$ ,  $Rp\{Pac_{21}...Pac_{2N}\}$  и  $\{Pac_{N1}...Pac_{NN}\}$ , которые выражены математическими или логическими символами. Таким образом, формируется концептуальная структура единичного решения (рис. 4).

Множество концептуальных структур единичного решения (D) в формальном виде будет представлено следующим образом [5, с. 345]:

$$D = \{d_1, d_2, \dots, d_m\}, d_i = z_i \cup q_i, i = \overline{1, m}. \quad (1)$$

Вершины  $d_i$  задают границы каждого действия, определяют операциональное (процедурное) содержание выделенных элементов, которые обладают набором свойств  $P(d_i)$ , образующих множество концептов  $C(d_i)$ , представленное формулой

$$C(d_i) = \{X(d_i), L(d_i), P(d_i), R(d_i)\}. \quad (2)$$

Тогда концептуальная модель предметной области является результатом логического объединения концептуальных структур:

$$C(D) = \bigcup_{i=1}^n C(d_i). \quad (3)$$

Для объединения  $C(d_i)$  необходимо выполнить ряд операций, аналогичных теоретико-множественным методам. При этом подразумевается, что действие  $Xa_2$  не может быть выполнено, пока не будет выполнено требуемое предыдущее действие  $Xa_1$ .

Содержательное наполнение концептуальной структуры полностью зависит от знаний и опыта эксперта. Поэтому большой диапазон деятельностей в сложной среде усложняет определение направления движения к цели. Каждый эксперт видит только цель своей деятельности в предметной области, в результате может быть не сформирована модель принятия решений.

В результате проведенных исследований выявлено следующее противо-

речие: с одной стороны, деятельностный подход не учитывает ситуативный аспект, с другой — ситуативный анализ не дает четкого понимания результата деятельности. Для снятия этих недостатков предложено синтезировать данные аспекты в единое представление — концептуальную структуру акта деятельности.

### Концептуальная структура акта деятельности

Элементы концептуальной структуры акта деятельности должны быть описаны терминами деятельностного подхода, т. е. необходимо спроецировать вершины категориальной схемы акта деятельности (см. рис. 3) на вершины концептуальной структуры (см. рис. 4).

Учитывая тот факт, что концептуальная структура существует в двух состояниях: до действия — как задача и после действия — как метод решения задачи, то можно утверждать, что отображение является биективным (взаимно однозначным). Это позволяет естественным образом формировать концептуальную структуру акта деятельности, которая в упрощенном варианте представлена на рис. 5.

Согласно полю знаний о проблемной ситуации между концептуальными структурами на уровне процессов выполняются операции пересечения:

- по объекту процесса. Объект участвует в двух или нескольких процессах, которые различны по своему содержанию. При этом продукт одного процесса служит исходным материалом для другого;
- по субъекту процесса. Субъект участвует в двух или нескольких процессах, которые различны по своему содержанию;
- по субъекту и объекту процесса. В данном пересечении выполняются два разных процесса, при этом "Субъект акта деятельности\_1" в "Процессе\_2" представлен как "Объект акта деятельности\_2";
- по объекту и компонентам процесса (средства и требования). Функциональные свойства "Средства акта деятельности\_1" являются продуктом



Рис. 5. Концептуальная структура акта деятельности

"Объекта акта деятельности\_2". Аналогично можно построить пересечение с компонентом акта деятельности "Требование\_1" и "Объектом акта деятельности\_2".

Выявленные пересечения приводят к возможности построения целостной концептуальной модели принятия решений, которая представлена как матрица решений. Она рассматривается как база знаний для проектирования экспертных систем, в которой может быть проведена проверка на полноту (решения по актам деятельности) и адекватность (решения по ситуациям). Решения по актам деятельности формируют функциональные свойства модели, а решение по ситуациям — структурные.

### Программная реализация

Очевидно, что построение концептуальных моделей — нетривиальная задача, требующая понимания методики деятельностного подхода, ситуационного анализа и особенностей предметной области. При этом возникают задачи, которые могут быть решены только на программном уровне.

*Первая задача* — визуализация концептуальных структур.

*Вторая задача* — проверка концептуальной модели на полноту и адекватность.

*Третья задача* — генерация базы знаний продукционного типа для экспертного моделирования.

Для решения первой задачи реализовано программное обеспечение (далее ПО) "Оформитель", которое представлено как хранилище концептуальных структур и определено следующим инструментарием для визуализации узлов, связей, текста и масштабирования (рис. 6). Изображенные концептуальные структуры представляются как XML-документ, который представлен в виде дерева узлов. Это позволяет получить доступ к любому элементу концептуальной структуры. Следовательно, можно изменять и обрабатывать их содержание на программном уровне.

Вторая и третья задача решаются ПО "Решатель" (рис. 6), которое поддерживает следующий набор функций [11]: создание, хранение, модифи-

кация, тестирование целостности и слияния пользовательских баз знаний продукционного типа; организация проведения и некоторая оптимизация прямого логического вывода; генерация отчетов с текстовыми описаниями баз знаний и результатами анализа проблемных ситуаций.

Совокупность взаимодействующего ПО создает программный комплекс (далее ПК) "Оформитель + Решатель" (рис. 6).

В ПО "Решатель" происходит чтение XML-файла, выделение из него необходимых фрагментов и построение первичной логической структуры, описывающей концептуальные схемы как размеченные ориентированные графы. В случае обнаружения каких-либо синтаксических ошибок в концептуальных структурах пользователю выдаются соответствующие сообщения.

Также происходит проверка баз знаний на полноту и адекватность. Все множество фактов делится на следующие группы: факты, описывающие начальную (или проблемную) ситуацию; факты, описывающие целевую ситуацию; факты, не включенные в начальную или целевую ситуацию, не рассматриваются.

Анализ совокупности концептуальных структур на адекватность начинается с установления значений фактов проблемной и целевой ситуации. Если путем логических выводов будет достигнута целевая ситуация, то на основании содержания сгенерированного текстового отчета устанавливается факт об адекватности и полноте вырабатываемой базы продукционных правил. Для концептуальной модели деятельности исследование на полноту и адекватность осуществляется путем проверки логических выводов по актам деятельности и по ситуациям. Полнота проверяется по классам ситуаций, а проверка на адекватность обусловлена логическими выводами по классам актов деятельности.

Если логический вывод прерывается по причине невозможности применения правил к начальной ситуации, то знания о проблемной ситуации характеризуются неполнотой и неадекватностью. При обнаружении неполноты или неадекватности следует доработать базу знаний.

Полученный отчет о результатах вывода должен соответствовать логике моделируемого процесса актов деятельности. База знаний продукционных правил для экспертных систем реализуется в текстовом файле, в котором указывается содержание правила в виде следующего конструкта:

*ЕСЛИ <Условия до действия>, ТО выполнить действие <Условия после действия>.*

Таким образом, продукционные правила описывают предусловия, которым



Рис. 6. Программный комплекс "Оформитель + Решатель"

должно удовлетворять состояние участвующих в действии объектов, и правила изменения состояния объектов в конце соответствующего действия.

### Заключение

Предложенные концептуальные структуры актов деятельности на основе синтеза категориальной схемы акта деятельности и концептуальной структуры единичного решения позволяют создать целостную концептуальную модель принимаемых решений, которая на программном уровне представлена базой знаний для проектирования экспертных систем.

В соответствии с системными представлениями существует ряд определений, в которых термин "система" рассматривается как средство начала ее исследования и проектирования. Тогда система не расчленяется на самые элементарные частицы (т. е. не разрушается полностью), а представляется как совокупность укрупненных компонентов, принципиально необходимых для существования и функционирования исследуемой системы [12, с. 629]. Существует возможность выделить из концептуальной структуры акта деятельности иные концептуальные представления для проектирования моделей, основанных на знаниях.

### Список литературы

1. Brehmer В. Dynamic decision making: Human control of complex systems // *Acta Psychologica*. 1992. № 81 (3). P. 211–241.
2. Сорокин А. Б. От системных представлений к концептуальному моделированию // XVIII междунар. научно-практ. конф. "Системный анализ в проектировании и управлении". Ч. 1. СПб.: СПб. политех. универ. 2016. С. 137–149.
3. Шедровицкий Г. П. Избранные труды. М.: Школа Культурной Политики, 1995. 800 с.
4. Болотова Л. С. Системы искусственного интеллекта: модели и технологии, основанные на знаниях. М.: Финансы и статистика, 2012. 663 с.
5. Дж. ван Гиг Прикладная общая теория систем. Том 1. Пер. с англ. М.: Мир, 1981. 336 с.
6. Черняк Ю. И. Системный анализ в управлении экономикой. М.: Экономика, 1975. 191 с.
7. Сурмин Ю. П. Теория систем и системный анализ: учеб. пособие. К.: МАУП, 2003. 368 с.
8. Анохин П. К. Философские аспекты теории функциональной системы: избр. тр. М.: Наука, 1978. 399 с.
9. Юдин Э. Г. Системный подход и принцип деятельности: Методологические проблемы современной науки. М.: Наука, 1978. 391 с.
10. Леонтьев А. Н. Деятельность. Сознание. Личность. М.: Политиздат, 1977. 304 с.
11. Болотова Л. С., Смольянинова В. А., Смирнов С. С. Концептуальное проектирование модели предметной области при помощи программных систем поддержки принятия решений // *Международный научно-технический журнал "Наукоемкие технологии"*, 2009. Т. 10. № 8. С. 23–28.
12. Теория систем и системный анализ в управлении организациями: Справочник: Учеб. пособие / Под ред. В. Н. Волковой и А. А. Емельянова. М.: Финансы и статистика, 2006. 848 с.

A. B. Sorokin, Ph. D. in Technique, Associate Professor, e-mail: ab\_sorokin@mail.ru,  
V. A. Smoljaninova, Ph. D. in Technique, Associate Professor, e-mail: valerysmol@mail.ru,  
Moscow Technological University (MIREA)

## Conceptual Design of Expert Systems of Support of Decision

*An original method for designing expert systems based on the conceptual structure of the act activity. For the construction of this structure to develop expert models is considered from the standpoint of systematic research activity approach and situational analysis. System views define that a dynamically complex environment should be considered as a large and complex system with the properties of polystructural and polyfunctionality. At the same time, the system creating factor in such an environment is activities. Element of activities of the person is the act of which is defined by the categorical scheme. When solving problems in a dynamically difficult environment, the field of knowledge in the form of a set of categorical schemes is formed. However the created field of knowledge doesn't consider a role of situationality. It is proposed to synthesize the ideas of the activity approach and situational analysis into a single structure. Thus, these interrelated aspects helped to determine the knowledge base for the design of expert systems, which is reflected in the conceptual structure of the activity act. However the graphic construction of the conceptual model of a dynamically complex environment is a complex and nontrivial task. Therefore, the program complex "Designer + Solver" is developed, which verifies the conceptual model of a dynamically complex environment on completeness and adequacy, and also generates the necessary knowledge base for the design of expert models in the form of text files.*

**Keywords:** big and complicated system, polystructural, polyfunctionality, act activity, situational analysis, conceptual structure of act activities

### References

1. Brehmer В. Dynamic decision making: Human control of complex systems // *Acta Psychologica*. 1992, no. 81 (3), pp. 211–241.
2. Sorokin A. B. Ot sistemnyh predstavlenij k konceptual'nomu modelirovaniju, XVIII mezhdunar. nauchno-prakt. konf. "Sistemnyj analiz v proektirovanii i upravlenii", Ch. 1. Sankt Peterburg, politech. univer., 2016, pp. 137–149. (in Russian).
3. Shhedrovickij G. P. *Izbrannye trudy*, Moscow, Shkola Kul'turnoj Politiki, 1995, 800 p. (in Russian).
4. Bolotova L. S. *Sistemy iskusstvennogo intellekta: modeli i tehnologii, osnovannye na znaniyah*, Moscow, Finansy i statistika, 2012, 663 p. (in Russian).
5. Dzh. van Gig. *Prikladnaja obshhaja teorija sistem*. Per. s angl. vol. 1. Moscow, Mir, 1981. 336 p. (in Russian).

6. Chernjak Ju. I. *Sistemnyj analiz v upravlenii jekonomikoj*, Moscow, Jekonomika, 1975. 191 p. (in Russian).

7. Surmin Ju. P. *Teorija sistem i sistemnyj analiz: ucheb. posobie*. Kiev, MAUP, 2003. 368 s. (in Russian).

8. Anohin P. K. *Filosofskie aspekty teorii funkcional'noj sistemy*: izbr. tr., Moscow, Nauka, 1978. 399 p. (in Russian).

9. Judin Je. G. *Sistemnyj podhod i princip dejatel'nosti: Metodologicheskie problemy sovremennoj nauki*, Moscow, Nauka, 1978. 391 p. (in Russian).

10. Leont'ev A. N. *Dejatel'nost'. Soznanie. Lichnost'*, Moscow, Politizdat, 1977. 304 p. (in Russian).

11. Bolotova L. S., Smol'janinova V. A., Smirnov S. S. Konceptual'noe proektirovanie modeli predmetnoj oblasti pri pomoshhi programnyh sistem podderzhki prinjatija reshenij, *Mezhdunarodnyj nauchno-tehnicheskij zhurnal "Naukoemkie tehnologii"*, 2009, vol. 10, no. 8, pp. 23–28. (in Russian).

12. *Teorija sistem i sistemnyj analiz v upravlenii organizacijami: Spravochnik: Ucheb. posobie*, Pod red. V. N. Volkovoj i A. A. Emel'janova, Moscow, Finansy i statistika, 2006, 848 p. (in Russian).

УДК 004.9, 004.56

А. А. Коляда, д-р физ.-мат. наук, гл. науч. сотр., e-mail: razan@tut.by,  
Научно-исследовательское учреждение "Институт прикладных физических проблем  
имени А. Н. Севченко" Белорусского государственного университета, г. Минск, Беларусь

## Обобщенная интегрально-характеристическая база модулярных систем счисления

*Статья посвящена проблеме построения обобщенной интегрально-характеристической базы модулярной арифметики. Теоретическую основу предлагаемого решения задачи составляет аппарат интервально-модулярных форм чисел. Для расчета интегральных характеристик модулярного кода (ранга, интервального индекса и коэффициентов полиадической формы целых чисел) разработан единый (общий) алгоритм. Ядром реализуемой вычислительной схемы служит процедура сужения кода. Для каждой интегральной характеристики модулярного кода (ИХМК) она определяет оценочное значение и двузначную корректирующую поправку (минимальную ИХМК). Показано, что для оптимизации немодульных операций наибольшими возможностями обладает интегрально-индексная характеристическая база, основанная на минимально избыточном модулярном кодировании. В этом случае вычислительная сложность расчетного соотношения для базовой ИХМК — интервального индекса — снижается от  $O(k^2)$  до  $O(k)$  модульных операций ( $k$  — число оснований системы счисления).*

**Ключевые слова:** модулярная система счисления, модулярная арифметика, интегральная характеристика модулярного кода, интервально-модулярная форма, ранг, интервальный индекс, полиадическая форма чисел

### Введение

Основу инноваций в современном процессе развития науки и техники, экономики, социальной жизни общества составляют информационные и коммуникационные технологии [1–9]. Это служит интенсифицирующим фактором роста уровня востребованности новых перспективных способов параллельной обработки как базового реализационного инструментария для эффективного решения трудоемких задач многочисленных актуальных приложений, в том числе на диапазонах больших чисел. В этом отношении особый интерес представляют модулярные вычислительные технологии [1–6] и, в частности, активно развиваемые в последние годы технологии, базирующиеся на совместном применении согласованных свойств параллелизма модулярных систем счисления (МСС) и искусственных нейронных сетей [5–7, 9].

В настоящее время модулярная арифметика (МА) широко используется в цифровой обработке сигналов, обработке изображений, спутниковых и

сотовых коммуникационных системах, беспроводных сенсорных сетях, при решении проблем множественного доступа с кодовым разделением каналов, криптографической защиты информации, контроля помехозащищенности данных, искусственного интеллекта, других областях [5–16]. Это обусловлено тем, что благодаря кодовому параллелизму модулярные вычислительные структуры имеют ряд фундаментальных преимуществ над позиционными структурами. К главным из таких преимуществ относятся: независимость времени выполнения операций модульного сложения, вычитания и умножения от числа оснований (модулей) МСС, высокая скорость вычислений в диапазонах больших чисел, гибкость базовых механизмов реконfigurирования компьютерных алгоритмов, эффективность кодовых конструкций с контролем ошибок, уникальность адаптационных свойств МА к параллельным вычислительным технологиям, в частности, к прогрессирующим технологиям на основе искусственных нейронных сетей. Преимущества МСС наиболее полно удастся реализовать в рамках

так называемого минимально избыточного модулярного кодирования [1, 17]. В отличие от неизбыточных аналогов [3, 6] минимально избыточная МА обладает гораздо большей эффективностью при выполнении проблемных для МСС операций [1, 17].

Исследования по проблематике оптимизации немодульных операций составляют ключевое направление развития модулярных вычислительных технологий.

Сложность немодульных процедур определяется используемой интегрально-характеристической базой, т. е. положенными в их основу интегральными характеристиками модулярного кода (ИХМК), а также связанными с ними позиционными формами элементов рассматриваемых диапазонов. Применяемые в МА-приложениях немодульные процедуры условно можно разделить на две группы. Первую группу образуют процедуры, использующие ИХМК, которые фактически содержат информацию о местоположении отвечающих им чисел в некотором диапазоне. Это имеет место в случае таких операций, как формирование знаковой функции, контроль переполнения и т. п. Ко второй группе относятся процедуры, не включающие ИХМК указанного рода, например, процедуры, основанные на интервально-индексных характеристиках кода минимально избыточной МСС и реализуемые с помощью интервально-модулярных форм чисел. Немодульными операциями этого типа являются, в частности, расширение минимально избыточного модулярного кода, масштабирование, общее деление целого числа, умножение Монтгомери по большему модулю, модулярно-позиционные кодовые преобразования и др. Несмотря на то что данные операции играют главенствующую роль при построении модулярных вычислительных систем, приводимый в данной статье алгоритм расчета ИХМК охватывает и характеристики, которые служат основой для немодульных процедур, отнесенных выше к первой группе. Таким образом, формируя все наиболее употребительные ИХМК, предлагаемый алгоритм правомерно квалифицировать как обобщенный.

### Интегральные характеристики и позиционные формы модулярных чисел

Введем обозначения:

- $\lfloor a \rfloor$  и  $\lceil a \rceil$  — наибольшее и наименьшее целые числа, соответственно не большее и не меньшее вещественной величины  $a$ ;
- $\mathbf{Z}_m = \{0, 1, \dots, m-1\}$ ,  $\mathbf{Z}_m^- = \{-\lfloor m/2 \rfloor, -\lfloor m/2 \rfloor + 1, \dots, \lceil m/2 \rceil - 1\}$  — множества наименьших неотрицательных и абсолютно наименьших вычетов по натуральному модулю  $m$ ;
- $|a|_m$  и  $|a|_m^-$  — элементы множеств  $\mathbf{Z}_m$  и  $\mathbf{Z}_m^-$ , сравнимые с  $a$  (в общем случае рациональным числом) по модулю  $m$ ;

- $\text{sn}(a)$  — знаковая функция вида

$$\text{sn}(a) = \begin{cases} 0, & \text{если } a \geq 0; \\ 1, & \text{если } a < 0. \end{cases}$$

На множестве  $\mathbf{Z}$  целых чисел МСС определяется базисом  $\mathbf{M} = \{m_1, m_2, \dots, m_k\}$  — набором попарно простых модулей (оснований)  $m_1, m_2, \dots, m_k$  ( $k > 1$ ). При этом произвольное целое число  $X \in \mathbf{Z}$  представляется кодом  $(\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_k)$  ( $\chi_i = |X|_{m_i}$  ( $i = \overline{1, k}$ )).

Максимальная мощность множества  $\mathbf{D}\{\mathbf{M}\}$  чисел  $X$ , на котором отображение  $X \rightarrow (\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_k)$  взаимно однозначно составляет  $M_k = \prod_{i=1}^k m_i$  элементов.

В этом случае  $\mathbf{D}\{\mathbf{M}\}$  выполняет роль диапазона МСС. Обычно в качестве диапазона используют  $\mathbf{Z}_{M_k}$  или  $\mathbf{Z}_{M_k}^-$ .

Согласно Китайской теореме об остатках [18] для целого числа  $X$  с модулярным кодом  $(\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_k)$  выполняются сравнения:

$$X \equiv \sum_{i=1}^l M_{i,l} \chi_{i,l} \pmod{M_l} \quad (l = \overline{2, k}), \quad (1)$$

где  $M_{i,l} = M_l / m_i$ ;  $M_l = \prod_{j=1}^l m_j$ ;  $\chi_{i,l} = |\mu_{i,l} \chi_i|_{m_i}$  — нормированный аналог  $i$ -й цифры кода  $(\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_l)$  целого числа  $X$  в МСС с базисом  $\{m_1, m_2, \dots, m_l\}$ ;

$\mu_{i,l} = |M_{i,l}^{-1}|_{m_i}$  — нормирующий коэффициент (вес) компоненты  $\chi_i$  кода  $(\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_l)$ . Из (1) следует, что для любого  $X$  при  $l = k$  существует единственное целое число  $\rho_k(X)$ , при  $l = k-1$  — целое число  $I_k(X)$ , которые удовлетворяют равенствам:

$$|X|_{M_k} = \sum_{i=1}^k M_{i,k} \chi_{i,k} - M_k \rho_k(X) \quad (2)$$

и

$$X = \sum_{i=1}^{k-1} M_{i,k-1} \chi_{i,k-1} + M_{k-1} I_k(X). \quad (3)$$

Величины  $\rho_k(X)$  и  $I_k(X)$  называются соответственно ранговой и интервально-индексной характеристиками  $k$ -го порядка, отвечающими числу  $X$  в базисе  $\mathbf{M}$  [19]. При этом выражения (2) и (3) называются ранговой и интервально-модулярными формами целых чисел.

Позиционные формы модулярных чисел, использующие специальные ИХМК, такие как ранг  $\rho_k(X)$  и интервальный индекс  $I_k(X)$  позволяют синтезировать немодульные процедуры, которые оперируют с вычетами стандартной разрядности.

При разработке алгоритмов МА наряду с  $I_k(X)$  используются также интервально-индексные характеристики меньшего порядка  $l$  ( $l < k$ ), которые определяются по базисам  $\{m_1, m_2, \dots, m_l\}$  интервально-модулярными формами

$$X = \sum_{i=1}^{l-1} M_{i, l-1} \chi_{i, l-1} + M_{l-1} I_l(X) (\chi_{i, l-1}) = |\mu_{i, l-1} \chi_i|_{m_i}, \mu_{i, l-1} = |M_{i, l-1}^{-1}|_{m_i}. \quad (4)$$

Важную роль при этом выполняют эвклидовы составляющие  $\hat{I}_l(X) = |I_l(X)|_{m_i}$  и  $J_l(X) = \lfloor I_l(X)/m_l \rfloor$  интервального индекса  $I_l(X)$  относительно модуля  $m_l$ ,

удовлетворяющие равенству  $I_l(X) = \hat{I}_l(X) + m_l J_l(X)$  и называемые соответственно компьютерным и главным интервальным индексом числа  $X$   $l$ -го порядка.

Для введенных ИХМК  $\rho_k(X)$  и  $I_k(X)$  верны [1, 19] приводимые ниже утверждения

**Утверждение 1.** (О ранге числа). В МСС с основаниями  $m_1, m_2, \dots, m_{k-1}, m_k \geq k-2$  ( $k > 1$ ) и диапазоном  $\mathbf{Z}_{M_k}$  ранг  $\rho_k(X) = \rho_k(|X|_{M_k})$  числа  $|X|_{M_k} = (\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_k)$  ( $X \in \mathbf{Z}$ ) представим в виде

$$\rho_k(X) = \hat{\rho}_k(X) + \Theta_k(X), \quad (5)$$

где

$$\hat{\rho}_k(X) = \left[ m_k^{-1} \sum_{i=1}^k R_{i, k}(\chi_i) \right]; \quad (6)$$

$$R_{i, k}(\chi_i) = |-m_i^{-1}|_{M_{i, k-1}} \chi_i |_{m_i} |_{m_k} \quad (i = \overline{1, k-1});$$

$$R_{k, k}(\chi_k) = \left| \frac{\chi_k}{M_{k-1}} \right|_{m_k}; \quad (7)$$

$\Theta_k(X)$  — двузначная величина, принимающая значения 0 или 1.

**Утверждение 2.** Для интервального индекса  $I_l(X)$  произвольного элемента  $X = (\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_l)$  диапазона  $\mathbf{Z}_{M_l}$  (см. (4)) МСС с основаниями  $m_1, m_2, \dots, m_{l-1}, m_l \geq l-2$  ( $l > 1$ ) справедлива формула

$$I_l(X) = \hat{I}_l(X) - m_l \Theta_l(X), \quad (8)$$

где

$$\hat{I}_l(X) = \left| \sum_{i=1}^l R_{i, l}(\chi_i) \right|_{m_l}; \quad (9)$$

$$R_{i, l}(\chi_i) = |-m_i^{-1}|_{M_{i, l-1}} \chi_i |_{m_i} |_{m_l} \quad (i \neq l),$$

$$R_{l, l}(\chi_l) = \left| \frac{\chi_l}{M_{l-1}} \right|_{m_l}; \quad (10)$$

$\Theta_l(X)$  — двузначная величина ( $\Theta_l(X) \in \{0, 1\}$ ), называемая минимальной ИХМК  $l$ -го порядка вида, отвечающая числу  $X$  в МСС с базисом  $\{m_1, m_2, \dots, m_l\}$  и диапазоном  $\mathbf{Z}_{M_l}$ .

При  $|\mathbf{D}\{\mathbf{M}\}| < M_k$  МСС с базисом  $\mathbf{M}$  избыточна. Кодовая избыточность позволяет существенно улучшить арифметические и иные свойства МСС. В частности, так называемое минимально избыточное модулярное кодирование [1, 17] обеспечивает уменьшение сложности процедуры расчета интервального индекса  $I_k(X)$ , входящего в состав интервально-модулярной формы (3), до предельно низкого уровня. Благодаря данному обстоятельству в исследованиях по оптимизации немодульных операций интервально-индексные характеристики и интервально-модулярные формы чисел занимают приоритетные позиции. Сущность минимально избыточного модулярного кодирования раскрывает нижеследующее утверждение.

**Утверждение 3.** (О минимально избыточном модулярном кодировании). Для того чтобы в МСС с попарно простыми основаниями  $m_1, m_2, \dots, m_k$  интервальным индексом  $I_k(X)$  каждого элемента

$X = (\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_k)$  диапазона  $\mathbf{Z}_{2M}^- = \{-M, -M+1, \dots, M-1\}$  ( $M = m_0 m_{k-1}$ ;  $m_0$  — вспомогательный модуль) полностью определялся компьютерным интервальным индексом — вычетом  $\hat{I}_k(X) = |I_k(X)|_{m_k}$ , необходимо и достаточно, чтобы  $k$ -е основание удовлетворяло условию

$$m_k \geq 2m_0 + k - 2 \quad (m_0 \geq k - 2). \quad (11)$$

При этом для  $I_k(X)$  верны расчетные соотношения:

$$I_k(X) = \begin{cases} \hat{I}_k(X), & \text{если } \hat{I}_k(X) < m_0, \\ \hat{I}_k(X) - m_k, & \text{если } \hat{I}_k(X) \geq m_0; \end{cases} \quad (12)$$

$$\hat{I}_k(X) = \left| \sum_{i=1}^k R_{i, k}(\chi_i) \right|_{m_k}; \quad (13)$$

$$R_{i, k}(\chi_i) = |-m_i^{-1}|_{M_{i, k-1}} \chi_i |_{m_i} |_{m_k} \quad (i \neq k),$$

$$R_{k, k}(\chi_k) = \left| \frac{\chi_k}{M_{k-1}} \right|_{m_k}. \quad (14)$$

Если минимально избыточная МСС ориентирована на оперирование в диапазоне неотрицательных целых чисел, то для получения требуемого аналога утверждения 3 достаточно диапазон  $\mathbf{Z}_{2M}^-$  заменить на  $\mathbf{Z}_M = \{0, 1, \dots, M-1\}$ , а условие (11) заменить на  $m_k \geq m_0 + k - 2$  ( $m_0 \geq k - 2$ ). При этом

расчетные соотношения (12)—(14) для интервального индекса остаются неизменными.

В исследованиях по проблематике немодульных операций традиционно в качестве базовых ИХМК активно используют цифры полиадического кода — кода так называемой обобщенной позиционной системы счисления. В обобщенной позиционной системе счисления с базисом  $\mathbf{M} = \{m_1, m_2, \dots, m_k\}$  целое число  $X \in \mathbf{Z}_{M_k}$  представляется в виде

$$X = \sum_{i=1}^k M_{i-1} x_i \left( M_0 = 1, M_{i-1} = \prod_{j=1}^{i-1} m_j (i \neq 1); x_i \in \mathbf{Z}_{m_i} \right). \quad (15)$$

Справедливо следующее утверждение.

**Утверждение 4.** Пусть в МСС с основаниями  $m_1, m_2, \dots, m_k$  задан произвольный элемент  $X = (\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_k)$  диапазона  $\mathbf{Z}_{M_k}$  и пусть  $L_l(X) = \sum_{i=1}^{l-1} M_{i,l-1} \chi_{i,l-1} + M_{l-1} \hat{I}_l(X)$  ( $2 \leq l \leq k$ ),  $\hat{I}_l(X)$  определяется по (9) с использованием (10). Тогда для коэффициентов полиадической формы (15) числа  $X$  верны формулы:

$$x_1 = \chi_1, x_2 = \hat{I}_2(X), x_3 = \hat{x}_3, \\ x_l = |\hat{x}_l + \Theta_{l-1}(X)|_{m_l} \quad (l = \overline{4, k}),$$

где  $\hat{x}_l = |J_{l-1}(L_l(X))|_{m_l}$  ( $l = \overline{3, k}$ ),  $J_{l-1}(L_l(X))$  — главный интервальный индекс целого числа  $L_l(X)$  в МСС с основаниями  $m_1, m_2, \dots, m_{l-1}$ , вычисляемый по правилу  $J_{l-1}(L_l(X)) = \hat{\rho}_{l-1}(X) + \hat{I}_l(X)$ ,

$$\hat{\rho}_{l-1}(X) = \left[ m_{l-1}^{-1} \sum_{i=1}^{l-1} R_{i,l-1}(\chi_i) \right];$$

вычеты  $R_{i,l-1}(\chi_i)$  определяются по формуле (10) (с заменой  $l$  на  $l-1$ );  $\Theta_{l-1}(X)$  — минимальная ИХМК  $(l-1)$ -го порядка, которая при  $m_{l-1} \geq l-3$  принимает значения 0 или 1.

#### Обобщенный алгоритм расчета интегральных характеристик МК

Наряду с утверждениями 1—4 в состав теоретико-методологической базы синтезированной обобщенной конфигурации алгоритма расчета ИХМК входят также нижеследующие утверждения.

**Утверждение 5.** Для ИХМК  $N(X) = \lfloor X/M \rfloor$  ( $M = m_0 M_{k-1}$ ,  $m_0 \geq k-2$ ), называемой интервальным номером целого числа  $X$  по базису  $\{m_1, m_2, \dots, m_{k-1}, m_0\}$  ( $m_k \geq 2m_0 + k-2$ ), справедлива формула  $N(X) = J(X) + \Theta(X)$ , где  $J(X) = \lfloor I_k(X)/m_0 \rfloor$  — главный интервальный индекс числа  $X$  относительно мо-

дуля  $m_0$ ;  $\Theta(X)$  — минимальная ИХМК, отвечающая числу  $X$  в МСС с основаниями  $m_1, m_2, \dots, m_{k-1}, m_0$ ;  $I_k(X)$  — интервальный индекс целого числа  $X$  по базису  $\mathbf{M}$  (см. (3)).

**Утверждение 6.** Пусть в МСС с основаниями  $m_1, m_2, \dots, m_{l-1}, m_l \geq l-2$  ( $2 \leq l$ ) целому числу  $X$  отвечает код  $(\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_l)$  и пусть  $J_l(X)$  — главный интервальный индекс данного числа. Знаки чисел  $X$  и  $J_l(X)$  совпадают при  $l=2$ , а также при  $l > 2$ , если  $J_l(X) \neq -1$ .

С учетом утверждения (2) (см. (8)) и утверждения 5 из интервально-модулярной формы (3) вытекают соотношения:

$$X = \sum_{i=1}^{k-1} M_{i,k-1} \chi_{i,k-1} + M_{k-1} \hat{I}(X) + MJ(X) \\ (X \in \mathbf{Z}_{2M}^-, \hat{I}(X) = |I_k(X)|_{m_0}; J(X) = \lfloor I_k(X)/m_0 \rfloor); \quad (16)$$

$$X = \sum_{i=1}^{k-1} M_{i,k-1} \chi_{i,k-1} + M_{k-1} I_k(X) |X|_M + \\ + M(J(X) + \Theta(X)) = |X|_M + MN(X) (I_k(|X|_M) = \\ = \hat{I}(X) - m_0 \Theta(X)); \quad (17)$$

$$\text{sn}(X) = \text{sn}(N(X)) = \text{sn}(J(X) + \Theta(X)). \quad (18)$$

Разработанный на основе утверждений 1—6 и равенств (16)—(18) обобщенный алгоритм расчета интегральных характеристик модулярных кодов заключается в нижеследующем.

#### Обобщенный алгоритм расчета ИХМК

Параметры алгоритма: попарно простые модули  $m_1, m_2, \dots, m_k$  базовой минимально избыточной модулярной системы счисления с диапазоном  $\mathbf{Z}_{2M}^- = \{-M, -M+1, \dots, M-1\}$  ( $M = m_0 M_{k-1}$ ), удовлетворяющие условиям  $m_l \geq l-1$  ( $l = \overline{2, k-1}$ ),  $m_k \geq 2m_0 + k-2$  ( $m_0 \geq k-2$ ).

Входные данные: минимально избыточный модулярный код  $(\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_k)$  произвольного элемента  $X$  диапазона  $\mathbf{Z}_{2M}^-$  по базису  $\mathbf{M} = \{m_1, m_2, \dots, m_k\}$ .

Выходные данные:

- минимальные ИХМК  $\Theta_l(X)$  ( $l = \overline{3, k}$ ) и  $\Theta(X)$ , отвечающие числу  $X$  в МСС с базисами  $\mathbf{M}$  и  $\{m_1, m_2, \dots, m_{k-1}, m_0\}$  соответственно;
  - интервальный индекс  $I_k(X)$  и знак  $\text{sn}(X)$  элемента  $X$  диапазона  $\mathbf{Z}_{2M}^-$ ;
  - ранг  $\rho_k(X)$ , интервальный индекс  $I_k(|X|_{M_k})$  и полиадический код  $\langle x_k x_{k-1} \dots x_1 \rangle$  целого числа  $|X|_{M_k} \in \mathbf{Z}_{M_k}$ ;
  - интервальный индекс  $I_k(|X|_M)$  и полиадический код  $\langle x_k x_{k-1} \dots x_1 \rangle$  целого числа  $|X|_M \in \mathbf{Z}_M$ , рассчитанные по базису  $\{m_1, m_2, \dots, m_{k-1}, m_0\}$ .
- Предварительно получаемые данные:

- коэффициенты нормировки цифр модулярного кода —  $\mu_{i, l-1} = |M_{i, l-1}^{-1}|_{m_i}$ ,  $\mu_{l, l} = |M_{l-1}^{-1}|_{m_l}$  ( $i = \overline{1, l-1}$ ;  $l = \overline{2, k}$ );
- аддитивные инверсии мультипликативных инверсий оснований  $m_1, m_2, \dots, m_{l-1}$  МСС по модулям  $m_l$ , т. е. константы  $m_{i, l} = |-m_i^{-1}|_{m_l}$  ( $i = \overline{1, l-1}$ ;  $l = \overline{2, k}$ ).

**Тело обобщенного алгоритма расчета интегральных характеристик модулярного кода**

**РИХ\_ОА.1.** Для минимально избыточного модулярного кода  $(\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_k)$  получить наборы вычетов  $R_l = \{R_{1, l}(\chi_1), R_{2, l}(\chi_2), \dots, R_{l-1, l}(\chi_{l-1}), R_l(\chi_l)\}$  ( $l = \overline{2, k}$ ), выполняя операции:

РИХ\_ОА.1А.  $\chi_{i, l-1} = |\mu_{i, l-1} \chi_i|_{m_i}$  ( $i = \overline{1, l-1}$ ),  
 $\chi_{l, l} = |\mu_{l, l} \chi_l|_{m_l}$ .

РИХ\_ОА.1Б.  $R_{i, l}(\chi_i) = |m_{i, l} \chi_{i, l-1}|_{m_i}$  ( $i = \overline{1, l-1}$ ),  
 $R_{l, l}(\chi_l) = \chi_{l, l}$ .

**РИХ\_ОА.2.** Рассчитать характеристики  $\hat{I}_l(X)$ ,  $\hat{\rho}_l(X)$  ( $l = \overline{2, k}$ ), следуя схемам:

$$\left\langle s_l = \sum_{i=1}^l R_{i, l}(\chi_i), \hat{I}_l(X) = |s_l|_{m_l}, \hat{\rho}_l(X) = \lfloor s_l / m_l \rfloor \right\rangle$$

( $l = \overline{2, k}$ ).

**РИХ\_ОА.3.** Для  $X$  найти интервальный индекс  $I_k(X)$  и его эвклидовы составляющие  $\hat{I}(X) = |I_k(X)|_{m_0}$ ,  $J(X) = \lfloor I_k(X) / m_0 \rfloor$ , реализуя действия:

РИХ\_ОА.3А. При  $\hat{I}_k(X) < m_0$  положить  $I_k(X) = \hat{I}_k(X)$ ,  $\hat{I}(X) = \hat{I}_k(X)$ ,  $J(X) = 0$  и перейти к РИХ\_ОА.4.

РИХ\_ОА.3Б. Интервально-индексным характеристикам  $I_k(X)$ ,  $\hat{I}(X)$  и  $J(X)$  присвоить значения  $I_k(X) = \hat{I}_k(X) - m_k$ ,  $\hat{I}(X) = I_k(X) + m_0$ ,  $J(X) = -1$ .

РИХ\_ОА.3В. В случае  $\hat{I}(X) < 0$  выполнить корректирующие операции:  $\hat{I}(X) = \hat{I}(X) + m_0$ ,  $J(X) = -2$ .

**РИХ\_ОА.4.** Для каждого  $l \in \{3, 4, \dots, k\}$  выполнить:

РИХ\_ОА.4А. Найти  $\hat{x}_l = \hat{\rho}_{l-1}(X) + \hat{I}_l(X)$ ,  $J_{l-1} = \hat{x}_l - m_l$ .

РИХ\_ОА.4Б. Обнулить булеву переменную  $S_l$ , а при  $l \neq 3$  и переменную  $\delta_l$ .

РИХ\_ОА.4В. Если  $J_{l-1} \geq 0$ , то положить  $\hat{x} = J_{l-1}$ ,  $S_l = 1$  и перейти к РИХ\_ОА.5.

РИХ\_ОА.4Г. При  $J_{l-1} = -1$  ( $l \neq 3$ ) переменной  $\delta_l$  присвоить значение  $\delta_l = 1$ .

**РИХ\_ОА.5.** Реализовать операционную последовательность:

РИХ\_ОА.5А. Получить  $\hat{x} = \hat{\rho}_{k-1}(X) + \hat{I}(X)$ ,  $J = \hat{x} - m_0$ .

РИХ\_ОА.5Б. Обнулить булевы переменные  $S$  и  $\delta$  ( $S = \delta = 0$ ).

РИХ\_ОА.5В. Если  $J \geq 0$ , то положить  $\hat{x} = J$ ,  $S = 1$  и перейти к РИХ\_ОА.6.

РИХ\_ОА.5Г. В случае, когда  $J = -1$ , переменной  $\delta$  присвоить значение  $\delta = 1$ .

**РИХ\_ОА.6.** Принимая во внимание равенство  $\Theta_2(X) = 0$ , сформировать минимальные ИХМК  $\Theta_3(X)$ ,  $\Theta_4(X)$ , ...,  $\Theta_{l-1}(X)$ ,  $\Theta_l(X)$ ,  $\Theta(X)$  согласно правилам  $\Theta_l(X) = S_l \vee \delta_l \Theta_{l-1}(X)$  ( $l = \overline{3, k}$ );  $\Theta(X) = S \vee \delta \Theta_{k-1}(X)$ .

**РИХ\_ОА.7.** В дополнение к вычисленным ИХМК, определить:

- знак  $\text{sn}(X) = \text{sn}(J(X) + \Theta(X))$  целого числа  $X \in \mathbf{Z}_{2M}^-$ ;
- ранг  $\rho_k(X) = \hat{\rho}_k(X) + \Theta_k(X)$ , интервальный индекс  $I_k(|X|_{M_k}) = \hat{I}_k(X) - m_k \Theta_k(X)$  и цифры  $x_1 = \chi_1$ ,  $x_2 = \hat{I}_2(X)$ ,  $x_3 = \hat{x}$ ,

$$x_l = \begin{cases} 0, & \text{если } \delta_l \Theta_{l-1}(X) = 1; \\ \hat{x}_l + \Theta_{l-1}(X), & \text{если } \delta_l \Theta_{l-1}(X) = 0; \end{cases}$$

( $l = \overline{4, k}$ ) полиадического кода  $\langle x_k x_{k-1} \dots x_1 \rangle$  числа  $|X|_{M_k} = (\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_k)$ ;

- интервальный индекс  $I_k(|X|_M) = \hat{I}(X) - m_0 \Theta(X)$  и старшую  $k$ -ю цифру

$$x = \begin{cases} 0, & \text{если } \delta \Theta_{k-1}(X) = 1; \\ \hat{x} + \Theta_{k-1}(X), & \text{если } \delta \Theta_{k-1}(X) = 0, \end{cases}$$

полиадического кода  $\langle x x_{k-1} \dots x_1 \rangle$  элемента  $|X|_M$  диапазона  $\mathbf{Z}_M$ .

**РИХ\_ОА.8.** Завершить работу алгоритма.

Методология построения интегрально-характеристической базы МСС, положенная в основу приведенного алгоритма ИХМК, характеризуется нижеследующими наиболее существенными отличительными признаками.

- Для получения всех ИХМК, включая цифры полиадического кода, в синтезированном алгоритме используется общее вычислительное ядро (см. РИХ\_ОА.2), имеющее параллельную структуру. Это позволяет достичь теоретического минимума времени формирования искомым характеристик, который составляет  $\lfloor \log_2 k \rfloor + 2$  модульных операций. В рамках традиционно применяемых

методов [2–7] формирование полиадического кода осуществляется по последовательным процедурам не менее чем за  $k$  модульных операций.

- Классические способы синтеза немодульных процедур не используют интервально-индексные характеристики. В сравнении с  $\hat{I}_k(X)$  расчетное соотношение для  $\hat{\rho}_k(X)$  имеет более высокую сложность. Поэтому применение характеристики (8) и интервально-модулярной формы (3) чисел как эффективной альтернативы по отношению к  $\rho_k(X)$  и ранговой форме (2) при решении проблемы немодульных операций является более предпочтительным.
- При минимально избыточном модулярном кодировании вычисление интервального индекса не требует минимальной ИХМК  $\Theta_k(X)$ , что дает принципиально новые возможности для упрощения немодульных процедур [1, 10, 11, 15, 16].
- Разработанный подход к построению интегрально-характеристической базы МСС позволяет в рамках единой алгоритмической конструкции формировать практически любые наборы наиболее употребительных ИХМК на стандартных и минимально избыточных симметричных диапазонах, а также на их частях. При этом расширение наборов рассчитываемых характеристик не влечет за собой существенного увеличения реализационных затрат, приходящихся на минимальную конфигурацию вычислительного ядра обобщенного алгоритма.

При параллельной реализации алгоритма РИХ\_ОА.1–РИХ\_ОА.8 для получения минимальных ИХМК  $\Theta_l(X)$  и  $\Theta(X)$  в принципе должны использоваться их нерекурсивные конфигурации

$$\Theta_l(X) = S_l \vee S_{l-1} \delta_l \vee S_{l-2} \delta_{l-1} \delta_l \vee \dots \vee S_3 \delta_4 \delta_5 \dots \delta_l \quad (l = \overline{3, k}); \quad (19)$$

$$\Theta(X) = S \vee S_{k-1} \delta \vee S_{k-2} \delta_{k-1} \delta \vee \dots \vee S_3 \delta_4 \delta_5 \dots \delta_k - 1 \delta, \quad (20)$$

позволяющие достичь максимального быстродействия. Однако при больших  $k$  соответствующее распараллеливание (19) и (20) приводит к существенному увеличению сложности необходимых логических схем. Применение в таких случаях схем с максимальным параллелизмом на практике может оказаться неоправданным.

### Демонстрационный пример

Рассмотрим МСС, определяемые базисом  $\mathbf{M} = \{m_1, m_2, m_3, m_4\} = \{3, 7, 11, 13\}$  из  $k = 4$  модулей. Согласно утверждению 3  $k$ -е основание  $m_k = m_4 = 13$  минимально избыточной МСС с данным базисом должно удовлетворять условию  $m_4 \geq 2m_0 + 2$  (см. (11)). Отсюда следует, что вспомогательный модуль

$m_0 \leq (13 - 2)/2 = 5,5$ . Наибольшую мощность диапазона  $\mathbf{Z}_{2M}$  минимально избыточной МСС обеспечивает  $m_0 = 5$ . В этом случае  $M = m_0 M_{k-1} = 5M_3 = 5 \times 3 \times 7 \times 11 = 1155$ . Таким образом, диапазоном минимально избыточной МСС служит множество  $\mathbf{Z}_{2 \times 1155} = \{-1155, -1154, \dots, 1154\}$ .

Рассчитаем требуемые для алгоритма РИХ\_ОА.1–РИХ\_ОА.8 константы:

$$\begin{aligned} M_1 &= m_1 = 3, \quad M_2 = m_1 m_2 = 3 \times 7 = 21, \\ M_3 &= m_1 m_2 m_3 = 3 \times 7 \times 11 = 231, \\ M_4 &= m_1 m_2 m_3 m_4 = 3 \times 7 \times 11 \times 13 = 3003, \\ M_{1,2} &= M_2/m_1 = 7, \quad M_{2,2} = M_2/m_2 = 3, \\ M_{1,3} &= M_3/m_1 = 77, \quad M_{2,3} = M_3/m_2 = 33, \\ M_{3,3} &= M_3/m_3 = 21, \end{aligned}$$

$$\mu_{1,1} = 1, \quad \mu_{1,2} = \left| M_{1,2}^{-1} \right|_{m_1} = \left| \frac{1}{7} \right|_3 = 1,$$

$$\mu_{2,2} = \left| M_{2,2}^{-1} \right|_{m_2} = \left| \frac{1}{3} \right|_7 = 5,$$

$$\mu_{1,3} = \left| M_{1,3}^{-1} \right|_{m_1} = \left| \frac{1}{7 \times 11} \right|_3 = 2,$$

$$\mu_{2,3} = \left| M_{2,3}^{-1} \right|_{m_2} = \left| \frac{1}{3 \times 11} \right|_7 = 3,$$

$$\mu_{3,3} = \left| M_{3,3}^{-1} \right|_{m_3} = \left| \frac{1}{3 \times 7} \right|_{11} = 10,$$

$$\mu_{4,4} = \left| M_{4,4}^{-1} \right|_{m_4} = \left| \frac{1}{3 \times 7 \times 11} \right|_{13} = 4,$$

$$m_{1,2} = \left| -\frac{1}{m_1} \right|_{m_2} = \left| -\frac{1}{3} \right|_7 = 2,$$

$$m_{1,3} = \left| -\frac{1}{m_1} \right|_{m_3} = \left| -\frac{1}{3} \right|_{11} = 7,$$

$$m_{1,4} = \left| -\frac{1}{m_1} \right|_{m_4} = \left| -\frac{1}{3} \right|_{13} = 4,$$

$$m_{2,3} = \left| -\frac{1}{m_2} \right|_{m_3} = \left| -\frac{1}{7} \right|_{11} = 3,$$

$$m_{2,4} = \left| -\frac{1}{m_2} \right|_{m_4} = \left| -\frac{1}{7} \right|_{13} = 11,$$

$$m_{3,4} = \left| -\frac{1}{m_3} \right|_{m_4} = \left| -\frac{1}{11} \right|_{13} = 7.$$

Пусть в минимально избыточной модулярной системе счисления с базисом  $\mathbf{M} = \{3, 7, 11, 13\}$  и диапазоном  $\mathbf{Z}_{2 \times 1155}$  задано целое число  $X$  с модулярным кодом  $(2, 5, 10, 4)$ . Следуя алгоритму РИХ\_ОА.1–РИХ\_ОА.8, получим для числа  $X$  базисовый набор ИХМК.

По расчетным соотношениям, используемым на шаге РИХ\_ОА.1, сформируем последовательности вычетов:

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_2 &= \{R_{1,2}(\chi_1), R_{2,2}(\chi_2)\} = \\ &= \{m_{1,2} | \mu_{1,1} \chi_1 | m_1 | m_2, | \mu_{2,2} \chi_2 | m_2\} = \\ &= \{|2| 1 \times 2 | 3 | 7, | 5 \times 5 | 7\} = \{4, 4\}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_3 &= \{R_{1,3}(\chi_1), R_{2,3}(\chi_2), R_{3,3}(\chi_3)\} = \\ &= \{m_{1,3} | \mu_{1,2} \chi_1 | m_1 | m_3, | m_{2,3} | \mu_{2,2} \chi_2 | m_2 | m_3, | \mu_{3,3} \chi_3 | m_3\} = \\ &= \{|7| 1 \times 2 | 3 | 11, | 3 | 5 \times 5 | 7 | 11, | 10 \times 10 | 11\} = \{3, 1, 1\}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_4 &= \{R_{1,4}(\chi_1), R_{2,4}(\chi_2), R_{3,4}(\chi_3), R_{4,4}(\chi_4)\} = \\ &= \{m_{1,4} | \mu_{1,3} \chi_1 | m_1 | m_4, | m_{2,4} | \mu_{2,3} \chi_2 | m_2 | m_4, \\ &\quad m_{3,4} | \mu_{3,3} \chi_3 | m_3 | m_4, | \mu_{4,4} \chi_4 | m_4\} = \\ &= \{|4| 2 \times 2 | 3 | 13, | 11 | 3 \times 5 | 7 | 13, | 7 | 10 \times 10 | 11 | 13, | 4 \times 4 | 13\} = \\ &= \{4, 11, 7, 3\}. \end{aligned}$$

Суммирование элементов последовательностей  $\mathbf{R}_2, \mathbf{R}_3, \mathbf{R}_4$  дает:

$$s_2 = \sum_{i=1}^2 R_{i,2}(\chi_i) = 4 + 4 = 8,$$

$$s_3 = \sum_{i=1}^3 R_{i,3}(\chi_i) = 3 + 1 + 1 = 5,$$

$$s_4 = \sum_{i=1}^4 R_{i,4}(\chi_i) = 4 + 11 + 7 + 3 = 25.$$

Согласно РИХ\_ОА.2  $\hat{I}_2(X) = |s_2|_{m_2} = |8|_7 = 1$ ,  $\hat{\rho}_2(X) = \lfloor s_2/m_2 \rfloor = \lfloor 8/7 \rfloor = 1$ ,  $\hat{I}_3(X) = |s_3|_{m_3} = |5|_{11} = 5$ ,  $\hat{\rho}_3(X) = \lfloor s_3/m_3 \rfloor = \lfloor 5/11 \rfloor = 0$ ,  $\hat{I}_4(X) = |s_4|_{m_4} = |25|_{13} = 12$ . Поскольку  $\hat{I}_k(X) = \hat{I}_4(X)$  превышает  $m_0 = 5$ , то в соответствии РИХ\_ОА.3Б интервальный индекс  $I_k(X) = I_4(X) = \hat{I}_4(X) - m_4 = 12 - 13 = -1$ , а компьютерный и главный интервальный индексы числа  $X$  относительно модуля  $m_0$  принимают соответственно значения  $\hat{I}(X) = |I_4(X)|_{m_0} = |-1|_5 = 4$  и  $J(X) = \lfloor I_4/m_0 \rfloor = \lfloor -1/5 \rfloor = -1$ .

Найдем величины  $\hat{x}_3 = \hat{\rho}_2(X) + \hat{I}_3(X) = 1 + 5 = 6$ ,  $\hat{x}_4 = \hat{\rho}_3(X) + \hat{I}_4(X) = 0 + 12 = 12$ ,  $J_2 = \hat{x}_3 - m_3 = 6 - 11 = -5$ ,  $J_3 = \hat{x}_4 - m_4 = 12 - 13 = -1$ . Так как  $J_2 < 0$ ,  $J_3 = -1$ , то согласно РИХ\_ОА.4Б, РИХ\_ОА.4В, РИХ\_ОА.4Г булевы переменные  $S_3$  и  $S_4$  подлежат обнулению:  $S_3 = S_4 = 0$ , а булевой переменной  $\delta_4$  присваивается значение  $\delta_4 = 1$ . В соответствии

РИХ\_ОА.5 вычислим  $\hat{x} = \hat{\rho}_3(X) + \hat{I}(X) = 0 + 4 = 4$ ,  $J = \hat{x} - m_0 = 4 - 5 = -1$ , и ввиду  $J = -1$  булевым переменным  $S, \delta$  присвоим значения  $S = 0, \delta = 1$ .

Получим минимальные ИХМК:

$$\begin{aligned} \Theta_2(X) &= 0, \Theta_3(X) = S_3 \vee \delta_3 \Theta_2(X) = 0, \Theta_4(X) = \\ &= S_4 \vee \delta_4 \Theta_3(X) = 0, \Theta(X) = S \vee \delta \Theta_3(X) = 0, \end{aligned}$$

а также характеристики:

- знак  $\text{sn}(X) = \text{sn}(J(X) + \Theta(X)) = \text{sn}(-1 + 0) = 1$  исходного целого числа  $X \in \mathbf{Z}_{2 \times 1155}^-$ ;
- интервальный индекс  $I_4(|X|_{M_4}) = \hat{I}_4(X) - m_4 \Theta_4(X) = 12 - 13 \times 0 = 12$  числа  $|X|_{M_4} = (\chi_1, \chi_2, \chi_3, \chi_4)$  из диапазона  $|\mathbf{Z}|_{M_4}$ ;
- цифры полиадического кода  $\langle x_4 x_3 x_2 x_1 \rangle$  целого числа  $|X|_{M_4}$ :  $x_1 = \chi_1 = 2, x_2 = \hat{I}_2(X) = 1, x_3 = \hat{x}_3 = 6, x_4 = |\hat{x}_4 + \Theta_3(X)|_{m_4} = 12$ ;
- интервальный индекс  $I_4(|X|_M) = \hat{I}(X) - m_0 \Theta(X) = 4 - 5 \times 0 = 4$  целого числа  $|X|_M$  в МСС с базисом  $\{3, 7, 11, 5\}$ ;
- цифры полиадического кода  $\langle x x_3 x_2 x_1 \rangle$  числа  $|X|_M$  в МСС с базисом  $\{3, 7, 11, 5\}$ :  $x = |\hat{x} + \Theta_3(X)|_{m_0} = |4 + 0|_5 = 4, x_3 = 6, x_2 = 1, x_1 = 2$ .

### Проверка корректности выполнения алгоритма

Для подтверждения достоверности полученных результатов воспользуемся интервально-модулярной и полиадической формами чисел (см. (3), (15)). С помощью (3) восстановим позиционное значение целого числа  $X$  по его модулярному коду (2, 5, 10, 4). С учетом  $\chi_{1,3} = |\mu_{1,3} \chi_1|_{m_1} = |2 \times 2|_3 = 1, \chi_{2,3} = |\mu_{2,3} \chi_2|_{m_2} = |3 \times 5|_7 = 1, \chi_{3,3} = |\mu_{3,3} \chi_3|_{m_3} = |10 \times 10|_{11} = 1$  и  $I_4(X) = -1$  интервально-модулярная форма (3) дает

$$\begin{aligned} X &= \sum_{i=1}^3 M_{1,3} \chi_{1,3} + M_3 I_4(X) = \\ &= M_{1,3} + M_{2,3} + M_{3,3} - M_3 = \\ &= 77 + 33 + 21 - 231 = -100. \end{aligned}$$

Проверка показывает, что в МСС с базисом  $\{3, 7, 11, 13\}$  число  $-100$  имеет код (2, 5, 10, 4), который совпадает с исходным модулярным кодом. Заданное целое число отрицательно, на что и указывает  $\text{sn}(X) = 1$ .

Согласно (15) сформированному алгоритмом РИХ\_ОА.1 — РИХ\_ОА.8 полиадическому коду  $\langle x x_3 x_2 x_1 \rangle = \langle 12 \ 6 \ 1 \ 2 \rangle$  отвечает число  $x_1 + M_1 x_2 + M_2 x_3 + M_3 x_4 = 2 + 3 \times 1 + 21 \times 6 + 231 \times 12 = 2903$ ,

которое является элементом  $|X|_{M_4} = |-100|_{3003} = 3003 - 100 = 2903$  диапазона  $Z_{M_4} = Z_{3003}$  МСС с базисом  $\{3, 7, 11, 13\}$  и имеет в данной МСС такой же код, как и целое число  $X = -100$ .

Что касается характеристик, формируемых для целого числа  $|X|_M = |-100|_{1155} = 1155 - 100 = 1055$  — интервального индекса  $I_4(|X|_M) = 4$  и полиадического кода  $\langle x_3 x_2 x_1 \rangle = \langle 4 \ 6 \ 1 \ 2 \rangle$  в МСС с базисом  $\{3, 7, 11, 5\}$  и диапазоном  $Z_M = Z_{1155}$ , то для подтверждения их достоверности достаточно воспользоваться позиционными формами (3) и (15) целого числа. Применение (3) и (15) к  $|X|_M$  дает

$$\begin{aligned} |X|_M &= \sum_{i=1}^3 M_{1,3} \chi_{1,3} + M_3 I_4(|X|_M) = \\ &= 77 + 33 + 22 + 4 \times 231 = X + 5 \times 231 = \\ &= -100 + 1155 = 1055, \\ |X|_M &= x_1 + M_1 x_2 + M_2 x_3 + M_3 x = \\ &= 2 + 3 \times 1 + 21 \times 6 + 4 \times 231 = 1055. \end{aligned}$$

### Заключение

Основные результаты представленной разработки по проблеме создания обобщенной интегрально-характеристической базы МА кратко можно охарактеризовать следующим образом.

- На базе аппарата интервально-модулярных форм построена универсальная алгоритмическая конструкция, в рамках которой формируются все известные ИХМК. Вычислительным ядром синтезированного обобщенного алгоритма расчета ИХМК служит процедура сужения интервально-модулярной формы, определяющая оценочные (приближенные) значения получаемых характеристик, а также двузначные поправки для них (минимальные ИХМК).
- Все рассчитываемые ИХМК — ранг, интервальный индекс и цифры полиадических кодов, имеют общую аддитивную структуру, объединяющую две компоненты: оценочное значение характеристики и соответствующую корректирующую поправку. Отмеченное обстоятельство и позволяет использовать для расчета базовых ИХМК немодулярных операций практически один и тот же алгоритм.
- Анализ реализационных свойств, применяемых на практике ИХМК и связанных с ними позиционных форм модулярных чисел показывает, что для решения проблемы оптимизации немодулярных процедур наибольшими возможностями обладает интервально-индексная характеристическая база, основанная на минимально избыточном модулярном кодировании. В этом случае вычислительная сложность расчетного соотношения для базовой ИХМК (интервального индекса) снижается от  $O(k^2)$  до  $O(k)$  модулярных операций.

- Разработанный обобщенный алгоритм расчета ИХМК допускает как последовательную, так и параллельную реализацию. В первом случае выполнение алгоритма занимает время  $O(k^2)$ , а во втором —  $O(\log_2 k)$  модулярных операций.

### Список литературы

1. Коляда А. А., Пак И. Т. Модулярные структуры конвейерной обработки цифровой информации. Мн.: Университетское, 1992. 256 с.
2. Сборник научных трудов "50 лет модулярной арифметике". Юбилейная международная научно-техническая конференция. Москва, Зеленоград, РФ, 11 дек., 2006. М.: МИЭТ, 2006. 510 с.
3. Omandi A., Premkumar B. Residue number systems: theory and implementation // Singapore: Imperial College Press, 2007. 311 p.
4. Инютин С. А. Основы модулярной алгоритмики. Ханты-Мансийск: Полиграфист, 2009. 347 с.
5. Червяков Н. И., Сиволясов Д. В., Ткачук М. В. Нейронная сеть для вычисления позиционной характеристики ранга числа, представленного в системе остаточных классов // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2003. № 10. С. 32–34.
6. Ananda Mohan P. V. Residue number systems: theory and applications. Basel: Birkhauser (mathematics), 2016. 351 p.
7. Червяков Н. И., Галушкин А. И., Евдокимов А. А., Лавриненко А. В. Применение искусственных нейронных сетей и системы остаточных классов в криптографии. М.: Физматлит, 2012. 280 с.
8. Тихонов Э. Е., Евдокимов А. А. Программно-аппаратная реализация нейронных сетей. Невинномысск: НИЭУП, 2013. 116 с.
9. Sanches D., Melin P., Castillo O. Optimization of modular granular neural networks using arhierarchical genetic algorithm based on the data base complexity applied to human recognition // Informations sciences. Tjijan Institute of Technology. 2015. Vol. 309. P. 73–101.
10. Каленик А. Н., Коляда А. А., Коляда Н. А., Чернявский А. Ф., Шабинская Е. В. Умножение и возведение в степень по большому модулю с использованием минимально избыточной модулярной арифметики // Информационные технологии. 2012. № 4. С. 37–44.
11. Коляда А. А., Коляда Н. А., Мазуренко П. А., Чернявский А. Ф., Шабинская Е. В. Таблично-сумматорная алгоритмизация минимально избыточной модулярной схемы Монтгомери для умножения по большому модулю // Наука и военная безопасность. 2013. № 3. С. 40–45.
12. Червяков Н. И., Бабенко М. Г., Коляда А. А., Лавриненко А. В. Разработка генератора псевдослучайных чисел на точках эллиптической кривой в нейросетевом модулярном базисе // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2014. № 9. С. 13–19.
13. Alhasan A., Saeed Agbedelnub I. The Hoffman's method of secured data encoding and error correction using residue number system (RNS) // Communication and Applied Electronics (CAE). 2015. № 9 (2). P. 14–18.
14. Яцкив В. В. Теоретические основы создания и структурная организация компонентов беспроводных сенсорных сетей повышенной эффективности. Автореферат диссертации д-ра техн. наук: 05.13.05. Компьютерные системы и компоненты. Львов, 2016. 43 с.
15. Коляда А. А., Чернявский А. Ф. Генерирование ключа дешифрования для криптосистемы RSA с применением минимально избыточной модулярной системы счисления // Наука. Инновации. Технологии. 2016. № 3. С. 31–44.
16. Коляда А. А., Кучинский П. В., Червяков Н. И. Применение минимально избыточной модулярной арифметики для выполнения криптографических преобразований в системе RSA // Инфокоммуникационные технологии. 2016. Т. 23, № 3. С. 12–18.
17. Чернявский А. Ф., Коляда А. А. Вычисление интегральных характеристик минимально избыточного модулярного кода // Докл. НАН Беларуси. 2015. Т. 59, № 6. С. 40–46.
18. Виноградов И. М. Основы теории чисел. М.: Наука, 1972. 168 с.
19. Коляда А. А., Чернявский А. Ф. Интегрально-характеристическая база модулярных систем счисления // Информатика. 2013. № 1. С. 106–119.

## Generalized Integrated Characteristic Base of Modular Number System

The article is devoted to the problem of constructing a generalized integrated characteristic base of modular arithmetic. The theoretical basis of the proposed solution of the problem is the apparatus of interval-modular forms of numbers. The single (general) algorithm is developed to calculate the integral characteristics of the modular code: rank, interval index, and coefficients of the polyadic form of integers. The core of the implemented computational scheme is a procedure of the code narrowing. It determines the estimated value and a two-digit correction (minimal ICMC) for each integral characteristic of a modular code (ICMC). It is shown that to optimize non-modular operations, the integral-index characteristic base, based on the minimally redundant modular coding, has the greatest capabilities. In this case, the computational complexity of the calculation ratio for the basic ICMC-interval index decreases from  $O(k^2)$  to  $O(k)$  modular operations ( $k$  is the number of bases of the number system).

**Keywords:** modular number system, modular arithmetic, integral characteristic of modular code, interval-modular form, rank, interval index, polyadic form of numbers

### References

1. **Koljada A. A., Pak I. T.** *Moduljarnye struktury konvejnnoj obrabotki cifrovoj informacii* (Modular structures of conveyor processing of digital information), Mn.: Universitetskoe, 1992. 256 p. (in Russian).
2. **Sbornik nauchnyh trudov "50 let moduljarnoj arifmetike". Jubilejnaja mezhdunarodnaja nauchno-tehnicheskaja konferencija**, Moscow, Zelenograd, RF, 11 dek., 2006. Moscow MIJeT, 2006. 510 p. (in Russian).
3. **Omandi A., Premkumar B.** *Residue number systems: theory and implementation*, Singapore: Imperial College Press, 2007. 311 p.
4. **Injutin S. A.** *Osnovy moduljarnoj algoritmiki* (Fundamentals of modular algorithms), Hanty-Mansijsk: Poligrafist, 2009. 347 p. (in Russian).
5. **Chervjakov N. I., Sivopljajsov D. V., Tkachuk M. V.** Nejronnaja set' dlja vychislenija pozicionnoj harakteristiki ranga chisla, predstavlennoho v sisteme ostatochnykh klassov (Neural network for calculating the positional characteristic of the rank of a number represented in residue number systems), *Nejrokomputery: razrab., primenenie*, 2003, no. 10, pp. 32–34. (in Russian).
6. **Ananda Mohan P. V.** *Residue number systems: theory and applications*, Basel: Birkhauser (mathematics), 2016. 351 p.
7. **Chervjakov N. I., Galushkin A. I., Evdokimov A. A., Lavrinenko A. V.** *Primenenie iskusstvennyh nejronnyh setej i sistemy ostatochnykh klassov v kriptografii* (Application of artificial neural networks and residue number system in cryptography), Moscow, Fizmatlit, 2012. 280 p. (in Russian).
8. **Tihonov Je. E., Evdokimov A. A.** *Programmno-apparatnaja realizacija nejronnyh setej* (Software and hardware implementation of neural networks), Nevinnomyssk: NIJeUP, 2013. 116 p. (in Russian).
9. **Sanches D., Melin P., Castillo O.** Optimization of modular granular neural networks using arhierarchical genetic algorithm based on the data base complexity applied to human recognition, *Informations sciences. Tjwan Institute of Technology*, 2015, vol. 309, pp. 73–101.
10. **Kalenik A. N., Koljada A. A., Koljada N. A., Chernjavskij A. F., Shabinskaja E. V.** Umnozenie i vozvedenie v stepen' po bol'shim moduljam s ispol'zovaniem minimal'no izbytochnoj moduljarnoj arifmetiki (Multiplication and exponentiation to large modules using the minimally redundant modular arithmetic), *Informacionnye tehnologii*. 2012, no. 4, pp. 37–44 (in Russian).
11. **Koljada A. A., Koljada N. A., Mazurenko P. A., Chernjavskij A. F., Shabinskaja E. V.** Tablichno-summatornaja algoritimizacija minimal'no izbytochnoj moduljarnoj shemy Montgomeri dlja umnozenija po bol'shim moduljam (Table-cumulative algorithmization of Montgomery's minimally redundant modular scheme for multiplication by large modules), *Nauka i voennaja bezopasnost'*. 2013, no. 3, pp. 40–45 (in Russian).
12. **Chervjakov N. I., Babenko M. G., Koljada A. A., Lavrinenko A. V.** Razrabotka generatora psevdosluchajnykh chisel na tochkah jellipticheskoj krivoj v nejrosetevom moduljarnom bazise (Development of a pseudo-random number generator on the points of an elliptic curve in a neural network modular basis), *Nejrokomputery: razrab., primenenie*, 2014, no. 9, pp. 13–19. (in Russian).
13. **Alhasan A. I., Agbedelnuh Saeed.** The Hoffman's method of secured data encoding and error correction using residue number system (RNS), *Communication and Applied Electronics (CUE)*. 2015, vol. 2, no. 9, pp. 14–18.
14. **Jackiv V. V.** Teoreticheskie osnovy sozdaniya i strukturnaja organizacija komponentov besprovodnyh sensoryh setej povyshennoj jeffektivnosti (Theoretical bases of creation and the structural organization of components of wireless sensor networks of increased efficiency), *Avtoreferat dissertacii doktora tehniceskikh nauk: 05.13.05. Kompjuternye sistemy i komponenty*. L'vov, 2016. 43 p. (in Russian).
15. **Koljada A. A., Chernjavskij A. F.** Generirovanie kljucha deshifrovaniya dlja kriptosistemy RSA s primeneniem minimal'no izbytochnoj moduljarnoj sistemy schislenija (Generating a decryption key for an RSA cryptosystem using a minimally redundant modular number system), *Nauka. Innovacii. Tehnologii*. 2016, no. 3, pp. 31–44 (in Russian).
16. **Koljada A. A., Kuchinskij P. V., Chervjakov N. I.** Primenenie minimal'no izbytochnoj moduljarnoj arifmetiki dlja vypolnenija kriptograficheskikh preobrazovanij v sisteme RSA (The use of minimally redundant modular arithmetic to perform cryptographic transformations in the RSA system), *Infokommunikacionnye tehnologii*. 2016, no. 3, pp. 12–18 (in Russian).
17. **Chernjavskij A. F., Koljada A. A.** Vychislenie integral'nyh harakteristik minimal'no izbytochnogo moduljarnogo koda (Calculation of the integral characteristics of minimally redundant modular code), *Doklady NAN Belarusi*, 2015, vol. 59, no. 6, pp. 40–46. (in Russian).
18. **Vinogradov I. M.** *Osnovy teorii chisel* (Fundamentals of number theory), Moscow, Nauka, 1972. 168 p. (in Russian).
19. **Koljada A. A., Chernjavskij A. F.** Integral'no-harakteristicheskaja baza moduljarnykh sistem schislenija (Integrated-characteristic modular base number systems), *Informatika*, 2013, no. 1, pp. 106–119 (in Russian).

# МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ MODELING AND OPTIMIZATION

УДК 658.512

**М. Х. Прилуцкий**, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой, e-mail: pril@iani.unn.ru,  
Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет  
им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород,

**В. С. Власов**, канд. техн. наук, начальник научно-исследовательского управления, e-mail: vlasov\_nn@mail.ru,  
ФГУП "ФНПЦ НИИИС им. Ю. Е. Седакова", г. Нижний Новгород,

**О. В. Кривошеев**, зам. директора по информационным технологиям и бизнес-процессам,  
e-mail: OIVKrivosheev@rosatom.ru, ФГУП "РФЯЦ ВНИИЭФ", г. Саров

## Задачи оптимального планирования как задачи распределения ресурсов в сетевых канонических структурах

*Строятся математические модели, формализующие процессы построения оптимальных планов для предприятий с единичным и мелкосерийным характером производства. В рамках построенных математических моделей ставятся и решаются задачи объемного, объемно-календарного и сменно-суточного планирования. Полученные теоретические результаты лежат в основе созданных программных продуктов, внедренных в эксплуатацию на предприятиях ГК "Росатом".*

**Ключевые слова:** математическая модель, сетевая каноническая структура, объемное планирование, объемно-календарное планирование, сменно-суточное планирование, система линейных уравнений транспортного типа, дискретно управляемая система, оптимальная стратегия, фронтальный алгоритм

### Введение

Вопросам оптимального планирования посвящено большое количество как зарубежных, так и отечественных работ. Среди зарубежных следует отметить работу [1], в которой предложена ставшая классической схема классификации задач теории расписаний (нотация Грэхема). В работах [2–4] дан обзор результатов анализа вычислительной сложности задач планирования, а также результатов построения приближенных методов их решения. Большой вклад в развитие теории расписаний внесли отечественные авторы [5–7]. Существуют программные средства, предназначенные для решения задач планирования. К ним относятся EPR-система (планирование ресурсов предприятия), APS-система (усовершенствованное планирование), системы управления проектами Project management, OpenPlan, Спайдер, MES-система ФОБОС и др. Однако анализ этих систем показал их неприменимость к решению задач планирования для предприятий с единичным и мелкосерийным характером производства. Это связано с тем, что эти системы носят общий характер, в них учитывается оборудование только "стандартного" типа, алгоритмы решения задач планирования не учитывают обратных связей. Кроме того, основная стратегия оптимизации в этих системах связана с приоритетностью заказов. При такой стратегии на второй план

отходят вопросы, существенные для предприятий с единичным и мелкосерийным производством, связанные со своевременным выполнением заданных директивных сроков, учетом эффективной загрузки оборудования.

Задачи оптимального планирования мы будем рассматривать для производственных систем, функционирующих по следующей схеме. Планированию подлежит заданная совокупность взаимозависимых работ, которые выполняются в дискретные моменты времени (такты планирования) при наличии в системе необходимых для их выполнения ресурсов.

Ресурсы классифицируют по сроку годности на складываемые, нескладываемые и частично-складываемые. К складываемым ресурсам относят материалы, сырье, полуфабрикаты. Эти ресурсы могут быть использованы в любой такт функционирования системы, причем, если в некоторый такт они не были использованы, то могут использоваться в любой последующий такт. К нескладываемым ресурсам относят трудовые ресурсы, фонд времени работы оборудования, транспортные средства. Эти ресурсы в случае, если они не были использованы в некотором такте планирования, в последующих тактах использованы быть не могут. Частично-складываемые ресурсы (химикаты, скоропортящиеся продукты) могут быть использованы в заданные интервалы планирования. Расходование ресурсов

может происходить с разными интенсивностями, от чего зависят и длительности выполнения работ.

Особенностями рассматриваемых систем является то, что выполнение определенных работ может приводить не только к потреблению работой необходимых для ее выполнения ресурсов, но и к производству ресурсов (как правило, полуфабрикатов), которые в дальнейшем используют для выполнения работ. Описанная схема соответствует условиям функционирования производственных систем с единичным и мелкосерийным характером производства.

Распределение ресурсов в рассматриваемых системах моделируется сетевой канонической структурой — ориентированными взвешенными графами без петель и контуров, элементам которых поставлены в соответствие определенные характеристики. Проблема оптимального планирования заключается в определении порядка выполнения заданной совокупности работ и стратегии распределения ресурсов между этими работами, при которых некоторые обобщенные показатели функционирования системы принимают экстремальные значения.

Изложенная здесь концепция является достаточно общей. В ее рамках формализуется широкий класс задач распределения ресурсов в сетевых канонических структурах [8—11] таких, как задачи объемного планирования, объемно-календарного планирования и сменно-суточного планирования.

## 1. Содержательное описание проблемы

**Задачи объемного планирования.** Требуется распределить общий план предприятия в объемных показателях — норма-часах, рублях, условных тоннах. Предполагается, что известными являются характеристики искомого плана, связанные с объемами работ по заказам, изделиям, тактам планирования. Формально задача объемного планирования ставится как задача определения таких объемов работ, которые будут выполнены в каждом подразделении, по каждому заказу, каждому изделию, каждой детали в каждый такт планирования, для которых выполняются ограничения, связанные с заданными показателями искомого плана, и достигают экстремальных значений критерии, определяющие условия эффективного функционирования производственной системы.

**Задачи объемно-календарного планирования.** Рассматриваются производственные системы, в которых выполняется взаимозависимая совокупность работ. Каждая работа для своего выполнения должна пройти обработку на машинах согласно заданному для этой работы технологическому маршруту, который в общем случае может быть произвольным. Для каждой работы определено время и затраты на ее выполнение на каждой машине согласно технологическому маршруту, соответствующему этой работе. Выполнение некоторых работ характеризуется не только потреблением ресурсов, необходи-

мых для ее выполнения, но и производством ресурсов (полуфабрикатов), которые используются в дальнейшем процессе производства. Введение ресурсов, производимых в результате выполнения работ, позволяет описывать сетевую технологию изготовления изделий: для работы, начало выполнения которой не может начаться, пока не будут выполнены непосредственно ей предшествующие работы, эти работы являются "ресурсами", без наличия которых работа не может начать выполняться. При обычных для таких задач условиях (работа выполняется на машине без перерывов, на машине одновременно может выполняться не более одной работы), требуется построить такое расписание выполнения работ, которому соответствуют "наилучшие" оценки качества функционирования системы.

**Задача сменно-суточного планирования.** В задачах сменно-суточного планирования для каждой работы (операции) указана длительность ее изготовления и ресурс, который должен быть использован для ее выполнения (конкретный тип станка, агрегата, оборудования). Для каждого ресурса указано время его поступления в систему (для станков обычно это время начала планирования, или, например, время начала работы станка после ремонта). Условия, налагаемые на функционирование системы, будем называть технологическими, организационными и ресурсными. К технологическим условиям относятся условия взаимозависимости выполнения работ, условия, связанные с интенсивностями потребления работами ресурсов, и условия, связанные с возможными длительностями выполнения работ. К организационным условиям относятся условия, связанные с моментами начала выполнения работ и условия, связанные с моментами окончания выполнения работ (директивные сроки). К ресурсным условиям относятся условия, связанные с расходом ресурсов при выполнении работ. Решением задачи сменно-суточного планирования является такое решение, для которого выполняются технологические, ресурсные и организационные условия и достигают экстремального значения критерии, определяющие условия эффективного функционирования производственной системы.

## 2. Математические модели и постановки задач планирования для предприятий с единичным и мелкосерийным характером производства

**Общая математическая модель и постановка задачи объемного планирования.** Пусть  $I$  — множество номеров подразделений предприятия;  $J$  — множество номеров заказов;  $K$  — множество номеров изделий;  $S$  — множество номеров деталей;  $T$  — множество номеров тактов планирования. Обозначим через  $a_{ijkst}$  — объем работ, оставшийся невыполненным в подразделении  $i$  по заказу  $j$  изделию  $k$  детали  $s$  в такт планирования  $t$ ;  $B_{jkst}$  — объем работ, запланированный к выполнению по заказу  $j$  изде-

лию  $k$  детали  $s$  в такт  $t$ ;  $C_{kst}^-$  и  $C_{kst}^+$  — минимальный и максимальный объемы работ, которые должны быть выполнены по изделию  $k$  детали  $s$  в такт  $t$ ,  $0 \leq C_{kst}^- \leq C_{kst}^+$ ;  $D_{kt}^-$  и  $D_{kt}^+$  — минимальный и максимальный объемы работ, которые должны быть выполнены в такт  $t$  по изделию  $k$ ,  $0 \leq D_{kt}^- \leq D_{kt}^+$ ;  $E_t^-$  и  $E_t^+$  — минимальный и максимальный объемы работ, которые должны быть выполнены всеми подразделениями в такт  $t$  в планируемом периоде,  $0 \leq E_t^- \leq E_t^+$ ;  $G$  — общий объем запланированных работ;  $i \in I, j \in J, k \in K, s \in S, t \in T$ .

Тогда формально задача объемно-календарного планирования для подразделений предприятия может быть поставлена как задача определения таких величин  $x_{ijkst}$  (объем работ, который будет выполнен в подразделении  $i$  по заказу  $j$  изделию  $k$  детали  $s$  в такт планирования  $t$ ),  $i \in I, j \in J, k \in K, s \in S, t \in T$ , для которых выполняются следующие ограничения:

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} x_{ijkst} = G \quad (1)$$

— выполнение общего объема запланированных работ в планируемом периоде;

$$E_t^- \leq \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{s \in S} x_{ijkst} \leq E_t^+, t \in T \quad (2)$$

— ограничения на объемы работ, которые должны быть выполнены по тактам планирования;

$$D_{kt}^- \leq \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{s \in S} x_{ijkst} \leq D_{kt}^+, k \in K, t \in T \quad (3)$$

— ограничения на объемы работ, которые должны быть выполнены по изделиям в заданные такты планирования;

$$C_{kst}^- \leq \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} x_{ijkst} \leq C_{kst}^+, k \in K, s \in S, t \in T \quad (4)$$

— ограничения на запланированные объемы работ по изделиям, деталям в заданные такты планирования;

$$\sum_{i \in I} x_{ijkst} = B_{jks}, j \in J, k \in K, s \in S, t \in T \quad (5)$$

— ограничения на запланированные объемы работ во всех подразделениях по заказам, изделиям, деталям и тактам планирования;

$$0 \leq x_{ijkst} \leq a_{jks}, i \in I, j \in J, k \in K, s \in S, t \in T \quad (6)$$

— естественные условия на переменные, формализующие требования запрета выпуска внеплановой продукции, с учетом минимизируемых критериев, которые в рассматриваемой постановке определяются контролируемыми ограничениями системы. В качестве контролируемых ограничений в зависимости от особенностей производственных систем могут выступать любые из ограничений (1)–(6).

**Общая математическая модель и постановка задачи объемно-календарного планирования.** Пусть  $I$  — множество работ, подлежащих выполнению;  $J$  — множество ресурсов, используемых для выполнения

работ;  $T$  — множество тактов (календарных периодов) планирования,  $|I| = n, |J| = m, |T| = t_0$ . Обозначим через  $J^-(i)$  — множество ресурсов, которые потребляются при выполнении работы  $i$ ;  $J^+(i)$  — множество ресурсов, которые будут произведены в результате выполнения работы  $i, i \in I$ . Пусть  $\mathbf{Q}(i)$  — вектор, компонента которого  $q_r^i$  определяет количество ресурса  $r$ , необходимое для выполнения работы  $i, r \in J^-(i)$ ;  $\mathbf{G}(i)$  — вектор, компонента которого  $g_l^i$  определяет количество ресурса  $l$ , которое будет произведено в результате выполнения работы  $i, l \in J^+(i), i \in I$ . Обозначим через  $t_i^-$  и  $t_i^+$  соответственно минимально и максимально возможные длительности выполнения работы  $i, t_i^- \in T, t_i^+ \in T,$

$i \in I$ ;  $t_i^s$  и  $t_i^d$  соответственно самый ранний срок возможного начала выполнения и самый поздний срок возможного завершения выполнения работы  $i, t_i^s \in T, t_i^d \in T, i \in I$ ;  $r_{ij}$  и  $R_{ij}$  соответственно минимальная и максимальная интенсивности потребления работой  $i$  ресурса  $j, 0 \leq r_{ij} \leq R_{ij} < \infty, i \in I, j \in J$ . Обозначим через  $\mathbf{V}(t)$  вектор, компонента которого  $v_j^t$  определяет количество ресурса  $j$ , которым будет располагать система в момент времени  $t, j \in J, t \in T$ .

Пусть  $S \times T$  — множество состояний системы, где  $S = \{s | s_j \geq 0, j \in J\}$  и состояние  $\langle s, t \rangle$  определяет наличие различных ресурсов, которыми система будет располагать в момент времени  $t, s \in S, t \in T$ . Множество управлений системой будем отождествлять с множеством работ  $I$ . Через  $I(s, t) = \{i | \mathbf{Q}(i) \leq \sum_{j \in J^-(i)} v_j^t \mathbf{V}(t)\}$  обозначим множество допустимых управлений в состоянии  $\langle s, t \rangle$  — множество работ, которые к моменту времени  $t$  обеспечены ресурсами, т. е. могут быть назначены к выполнению. Здесь  $\sum_{j \in J^-(i)} v_j^t \mathbf{V}(t)$  — проекция вектора  $\mathbf{V}(t)$  на компоненты, определяемые множеством  $J^-(i)$ . Через  $c(i, s, t, s', t')$  обозначим "доход", который система приобретет, если под управлением  $i$  из состояния  $\langle s, t \rangle$  она перейдет в новое состояние  $\langle s', t' \rangle$ . Значения функции дохода  $c(i, s, t, s', t')$  зависят от ресурсов, которые система использует для выполнения работы  $i$ , ресурсов, которые система произведет в результате выполнения работы  $i$ , а также от исходных параметров, характеризующих работу  $i, s \in S, s' \in S, i \in I, t \in T, t' \in T$ .

Система функционирует следующим образом. В состоянии  $\langle s, t \rangle$  (известно, какие ресурсы и в каком количестве доступны системе), под воздействием управления  $i, i \in I(s, t)$  (работа, обеспеченная ресурсами) система переходит в новое состояние

$\langle s', t' \rangle$ , где  $s'_j = s_j - q_j^i, j \in J^-(i)$  (соответствующий ресурс уменьшается на величину, используемую на выполнение работы),  $s'_j = s_j + g_j^i, j \in J^+(i)$  (соответствующий ресурс увеличивается на величину, произведенную в результате выполнения работы). При таком переходе в системе выполняется работа  $i$ , что отражается в удалении этой работы из множества  $I$ , и приобретает доход, определяемый функцией  $c(i, s, t, s', t')$ . Функционирование системы осуществляется до тех пор, пока все работы не будут выполнены. Требуется найти такую стратегию управления системой, при которой полный, суммарный доход, приобретенный системой за все время функционирования, будет максимальным.

Стратегию управления системой будем отождествлять с функцией  $\varphi(s, t)$ , определенной на множестве  $S \times T$  со значениями из  $I$ . Обозначим через  $(\mu(s, t, I', \varphi(s, y)))$  — суммарный доход, который система приобретет, если она находится в состоянии  $\langle s, t \rangle$ , остались невыполненными работы из множества  $I'$  и к системе будут применены управления, определяемые заданной стратегией  $\varphi(s, t)$ . Тогда исходная задача будет заключаться в определении такой стратегии  $\varphi_0(s, t)$ , для которой выполняется:  $\mu(s, t, I', \varphi_0(s, t)) = \max(\mu(s, t, I', \varphi(s, t)))$ , где  $\max$  берется по всем возможным стратегиям  $\varphi(s, t)$ . Стратегию  $\varphi_0(s, t)$  в дальнейшем будем называть оптимальной стратегией. Оптимальная стратегия определяет оптимальный объемно-календарный план производства.

**Общая математическая модель и постановка задачи сменно-суточного планирования.** Пусть  $T = \{1, 2, \dots, T_0\}$  — множество тактов планирования;  $J$  — множество всех работ;  $K(j)$  — множество работ, непосредственно предшествующих работе с номером  $j, j \in J$ ;  $I$  — множество различных ресурсов;  $n_i$  — срок годности ресурса  $i, i \in I, n_i \in T$ ; причем, если  $n_i = 1$ , то ресурс является нескладируемым, при  $n_i = T_0$  — ресурс является складируемым, при  $2 \leq n_i < T_0$  — ресурс является частично-складируемым.

**Технологические параметры:**  $r_{ij}$  — ресурсоемкость работы  $j$  по ресурсу  $i, i \in I, j \in J$ ;  $m_{ij}$  и  $M_{ij}$  — соответственно минимальная и максимальная интенсивности потребления работой  $j$  ресурса  $i, i \in I, j \in J$ ;  $t_j^-$  и  $t_j^+$  — соответственно, минимальная и максимальная длительности выполнения работы  $j, j \in J$ .

**Организационные параметры:**  $q_j$  — ранний срок возможного начала выполнения работы  $j, j \in J$ .

$D_j$  — директивный срок окончания выполнения работы  $j, j \in J^D$ , где  $J^D$  — множество работ, имеющих директивные сроки,  $J^D \subseteq J$ .

**Ресурсные параметры:**  $V_{it}$  — количество ресурса  $i$ , которое в такт  $t$  поступит в систему,  $i \in I, t \in T$ .

**Варьируемые параметры математической модели:**  $x = (x_1, x_2, \dots, x_{|J|})$  — вектор времен начала выполнения работ,  $y = (y_1, y_2, \dots, y_{|J|})$  — вектор времен окончания выполнения работ;  $z_{ijt}$  — интенсивность потребления работой  $j$  ресурса  $i$  в такт  $t, i \in I, j \in J, t \in T$ .

## Ограничения математической модели

### Технологические ограничения

Варьируемые параметры модели  $(x_j, y_j, z_{ijt}, i \in I, j \in J, t \in T)$  определяют множество частично-целочисленных неотрицательных переменных

$$\begin{aligned} x_j \in T, y_j \in T, j \in J, \\ z_{ijt} \geq 0, i \in I, j \in J, t \in T. \end{aligned} \quad (7)$$

Взаимозависимость работ, определяющая каноничность сетевой модели, задается ограничениями

$$x_j \geq \max_{l \in K(j)} y_l, j \in J. \quad (8)$$

Ограничения на интенсивности потребления работами ресурсов и требования выполнения работ без перерывов

$$\begin{aligned} m_{ij} \leq z_{ijt} \leq M_{ij}, x_j \leq t \leq y_j, i \in I, j \in J, t \in T, \\ z_{ijt} = 0, e, \text{ если } i \notin [x_j, y_j], i \in I, j \in J, t \in T. \end{aligned} \quad (9)$$

Ограничения на длительности выполнения работ

$$\begin{aligned} t_j^- \leq y_j - x_j, j \in J, \\ y_j - x_j \leq t_j^+, j \in J. \end{aligned} \quad (10)$$

Полное использование необходимых ресурсов означает полное выполнение работ

$$\sum_{t \in T} z_{ijt} = r_{ij}, i \in I, j \in J. \quad (11)$$

### Организационные ограничения

Ограничения на сроки начала работ:

$$x_j \geq q_j, j \in J; \quad (12)$$

Ограничения на сроки окончания работ

$$y_j \leq D_j, j \in J^D. \quad (13)$$

### Ресурсные ограничения

Обозначим через  $P_{it} = \sum_{t'=1}^t V_{it'} - \sum_{j \in J} \sum_{t'=1}^{t+n_i-1} z_{ijt'}$  —

$t-1$  —  $\sum_{t'=1} \max(0, P_{it'})$ , где  $\max(0, P_{it'})$  — потери ресурса  $i$ , поступившего в систему в такт  $t$ , ввиду истечения срока его годности, тогда  $W_{it} = \sum_{t'=1}^t V_{it'} - \sum_{j \in J} \sum_{t'=1}^{t-1} z_{ijt'}$  —

$t-n_i$  —  $\sum_{t'=1} \max(0, P_{it'})$  — количество ресурса  $i$ , которое может быть использовано в такт  $t$  для выполнения работ. С учетом введенных ограничений ресурсные условия в общем случае имеют вид:

$$\sum_{j \in J} z_{ijt} \leq W_{it}, i \in I, j \in J. \quad (14)$$

Исходные параметры, варьируемые параметры и ограничения (7)–(14) представляют собой общую математическую модель проблемы сменно-суточного планирования.

Из всех ограничений математической модели, в рамках которой ставится задача сменно-суточного планирования, выделяются так называемые "мягкие ограничения" т. е. те ограничения, нарушение которых приводит к построению расписаний, для которых могут быть не выполнены некоторые ограничения математической модели. Например, если такими ограничениями являются ограничения (13), связанные с директивными сроками выполнения работ, то построенные расписания будут определять порядок выполнения работ полностью обеспеченный ресурсами, но с возможными нарушениями заданных директивных сроков. Эти мягкие ограничения исключают из математической модели и переводят в критерии оптимальности, определяющие эффективность получаемых решений. Критериями оптимальности для рассматриваемых задач могут выступать организационные условия, связанные со сроками окончания выполнения работ (директивными сроками) или ресурсные условия, связанные с необеспечением расписания необходимыми для их выполнения ресурсами. Например, если эффективность построенных расписаний зависит от выполнения директивных сроков, то условия (13) исключают из математической модели и вводят критерий

$$F(x, y, z) = \sum_{j \in J^D} c_j \max(0, y_j - D_j). \quad (15)$$

Здесь  $c_j$  — штрафные санкции, которые получит система, если работа  $j$  будет выполнена на один такт позже заданного для этой работы директивного срока,  $j \in J^D$ .

### 3. Схемы решения задач планирования

**Решение задач объемного планирования.** Преобразуем систему ограничений (1)—(6) задачи объемно-календарного планирования в систему с двусторонними ограничениями:

$$G^- \leq \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} x_{ijkst} \leq G^+; \quad (16)$$

$$E_t^- \leq \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{s \in S} x_{ijkst} \leq E_t^+, t \in T; \quad (17)$$

$$D_{kt}^- \leq \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{s \in S} x_{ijkst} \leq D_{kt}^+, k \in K, t \in T; \quad (18)$$

$$C_{kst}^- \leq \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} x_{ijkst} \leq C_{kst}^+, k \in K, s \in S, t \in T; \quad (19)$$

$$B_{jkst}^- \leq \sum_{i \in I} x_{ijkst} \leq B_{jkst}^+, j \in J, k \in K, s \in S, t \in T; \quad (20)$$

$$0 \leq x_{ijkst} \leq a_{ijkst}, i \in I, j \in J, k \in K, s \in S, t \in T, \quad (21)$$

где  $G^- = G^+ = G$ ,  $B_{jkst}^- = B_{jkst}$ ,  $B_{jkst}^+ = G$ ,  $j \in J, k \in K, s \in S, t \in T$ .

Так как для системы (16)—(21) выполняется  $\emptyset \subset \{t\} \subset \{k, t\} \subset \{k, t, s\} \subset \{k, t, s, j\} \subset \{k, t, s, j, i\}$ ,

то согласно [10], система моделируется корневым ориентированным деревом, в котором ограничение (16) соответствует корню дерева, ограничения (21) — листьям, ограничения (17)—(20) — промежуточным вершинам дерева.

Найдем следующие величины:

$$\begin{aligned} B_{jkst}^{p-} &= B_{jkst}^-, B_{jkst}^{p+} = \sum_{i \in I} a_{ijkst} \\ j \in J, k \in K, s \in S, t \in T; \\ C_{kst}^{p-} &= \max\left(C_{kst}^-, \sum_{j \in J} B_{jkst}^{p-}\right), \\ C_{kst}^{p+} &= \min\left(C_{kst}^+, \sum_{j \in J} B_{jkst}^{p+}\right); \\ D_{kt}^{p-} &= \max\left(D_{kt}^-, \sum_{s \in S} C_{kst}^{p-}\right), \\ D_{kt}^{p+} &= \min\left(D_{kt}^+, \sum_{s \in S} C_{kst}^{p+}\right); \\ E_t^{p-} &= \max\left(E_t^-, \sum_{k \in K} D_{kt}^{p-}\right), \\ E_t^{p+} &= \min\left(E_t^+, \sum_{k \in K} D_{kt}^{p+}\right); \\ G^{p-} &= \max\left(G^-, \sum_{t \in T} E_t^{p-}\right), \\ G^{p+} &= \min\left(G^+, \sum_{t \in T} E_t^{p+}\right). \end{aligned} \quad (22)$$

Из работы [4] следует, что система ограничений (16)—(21), а тем самым и исходная система (1)—(6), совместна тогда и только тогда, когда

$$\begin{aligned} G^{p-} &\leq G^{p+}; E_t^{p-} \leq E_t^{p+}, t \in T; \\ D_{kt}^{p-} &\leq D_{kt}^{p+}, k \in K, t \in T; \\ C_{kst}^{p-} &\leq C_{kst}^{p+}, k \in K, s \in S, t \in T; \\ B_{jkst}^{p-} &\leq B_{jkst}^{p+}, j \in J, k \in K, s \in S, t \in T. \end{aligned} \quad (23)$$

Алгоритм решения задачи объемного планирования основан на использовании эффективных процедур проверки на совместность систем линейных двусторонних алгебраических неравенств транспортно-портного типа (16)—(21).

**Решение задачи объемно-календарного планирования.** Для рассматриваемой системы выполняется свойство Маркова — поведение системы в момент времени  $t$  зависит только от состояния системы в этот момент времени и не зависит от поведения системы до момента  $t$ . Выполнение этого свойства с учетом аддитивности дохода, приобретаемого системой в процессе функционирования, позволяет применить к рассматриваемой системе принцип оптимальности динамического программирования (принцип Р. Беллмана). Обозначим через  $v(s, t, I')$  суммарный доход, который система приобретет, если она находится в состоянии  $\langle s, t \rangle$ , остались не выполнены работы из множества  $I'$  и к системе

применены управления, задаваемые оптимальной стратегией. Тогда

$$v(s, t, I') = \max[c(i, s, t, s', t') + v(s', t', I' \setminus \{i\})], (24)$$

где  $\max$  берется по всем  $i$  из множества  $I'(s, t)$ .

Рекуррентные соотношения (24), с учетом граничных условий  $v(s, t, I) = 0$ , если  $I = \emptyset$ , могут быть использованы для определения оптимальной стратегии.

#### **Решение задачи сменно-суточного планирования.**

**Классический фронтальный алгоритм.** Пусть  $t$  — произвольный такт планирования,  $t \in T$ . Назовем "фронтом работ"  $F(t)$  — множество работ, любая из которых может выполняться, начиная с такта  $t$ ,  $t \in T$ . Для выбора очередной работы из фронта работ перейдем от множества  $F(t)$  к вектору работ  $\rho(t) = (\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_k)$ , компоненты которого и будут определять порядок выполнения работ.

Для перехода от множества работ к вектору работ используют различные стратегии упорядочения работ:

- по резервам времени;
- по приоритетам работ;
- по длительности выполнения работ;
- по числу работ, следующих за данной работой;
- по номерам работ.

На основании этих стратегий, с учетом их лексикографического упорядочения в порядке уменьшения их значимости и строится вектор  $\rho(t) = (\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_k)$ , компоненты которого и будут определять порядок выполнения работ в заданном такте планирования. Классический фронтальный алгоритм является алгоритмом без обратных связей, что для задач большой вычислительной сложности, к которым относятся и задачи сменно-суточного планирования, не гарантирует высокого качества решения.

**Фронтальный алгоритм с рангами.** Этот алгоритм основан на введении рангов для выполняемых работ. Оценка полученного решения определяется суммарным штрафом, связанным со значением критерия построенного расписания выполнения работ.

Работа алгоритма включает в себя три основные процедуры: процедуру классического фронтального алгоритма; процедуру начисления рангов и процедуру переупорядочения работ.

Процедура классического фронтального алгоритма состоит в построении расписания выполнения работ, для которого определено значение выбранного критерия.

Процедура формирования рангов состоит в анализе полученного расписания и начисления работам, которые определяют значение критерия для построенного расписания, коэффициентов (рангов), определяющих вклады этих работ в значение критерия.

Процедура переупорядочения работ заключается в построении векторов работ с учетом рангов, присвоенных работам.

Фронтальный алгоритм с рангами использует в своей работе обратную связь, что позволяет стро-

ить расписания более эффективные, чем построенные с использованием классического фронтального алгоритма.

#### **4. Решение производственных задач оптимального планирования**

Рассматриваются задачи планирования процесса изготовления интегральных схем с микронными и субмикронными топологическими нормами: кристалльного производства изделий микронной микроэлектроники (БИС), кристалльного производства изделий субмикронной микроэлектроники (СБИС) и сборочного производства микросхем. Особенности технологического процесса производства БИС и СБИС характеризуются [12]: разнообразием номенклатуры изделий, одновременно запущенных в производство; использованием различных технологических маршрутов в соответствии с номенклатурой изготавливаемых изделий; сложным и длительным технологическим маршрутом процесса производства каждого типа БИС и СБИС; большим количеством используемого оборудования основного и вспомогательного производства (нескладируемые ресурсы); разнообразием режимов работы технологического оборудования; введением сплошного межоперационного контроля; большой номенклатурой используемых материалов (складируемые ресурсы) и химических реактивов и реагентов (частично-складируемые ресурсы).

Учитывая специфические особенности технологического процесса производства интегральных схем для решения задач планирования, использование существующих на рынке программных продуктов невозможно. Для решения указанного класса задач с использованием языка программирования C# среды .NET (семейство операционных систем Windows) разработано программное обеспечение, внедренное в постоянную эксплуатацию при планировании процесса производства изделий микроэлектроники во ФГУП "ФНПЦ НИИИС им. Ю. Е. Седакова" (Нижний Новгород) [12, 13].

Результатом решения задачи объемного планирования является определение объемов работ, которые будут выполнены в подразделениях и которые определяют условия эффективного функционирования производственной системы.

В результате решения задачи объемно-календарного планирования формируется график выполнения технологических операций с учетом имеющихся или планируемых производственных мощностей; определяются контрольные сроки завершения выполнения промежуточных этапов каждого заказа (с точностью до партии пластин), согласованные с директивными сроками изготовления заказов; формируются отчеты по материалам, требуемым для выполнения операций.

При решении задачи сменно-суточного планирования учитываются факты выполнения технологических операций с учетом их приоритетов, со-

блюдением критериев межоперационных времен хранения, условий и критериев аттестационных и подготовительных процессов, а также планирование операций всех требуемых вспомогательных процессов. Решение этой задачи обеспечивает формирование сменно-суточных заданий для производства микросхем, задействованных в реализации запланированных заказов; позволяет строить расписание выполнения технологических операций, отображаемых в виде графиков Ганта с учетом текущего выполнения сменно-суточных заданий; позволяет решать задачи ситуационного анализа — формирование карты состояния производства через заданный промежуток времени, содержащей информацию о готовностях выполнения заказов в директивные сроки в зависимости от введенного описания внешнего воздействия.

Полученные теоретические результаты позволили реализовать программное обеспечение для решения задач внутрицехового планирования для ФГУП "РФЯЦ ВНИИЭФ" в части расчета оптимизированных сроков запуска-выпуска производственных заказов, оптимального распределения производственных заказов по цеховому оборудованию [14]. В результате решения задач внутрицехового планирования формируется расписание выполнения заказов, в котором определены сроки начала и окончания выполнения технологических операций каждого изделия, составной части изделия производственного заказа, запланированного цеху для выполнения в заданном плановом периоде.

В результате решения этой задачи разработанное программное обеспечение позволяет: проводить автоматизированный расчет расписания выполнения производственных заказов для цеха по плановым периодам; проводить автоматизированный расчет с учетом заданного распределения технологических операций на цеховое оборудование, что дает возможность проводить автоматизированную корректировку расписания выполнения производственных заказов цеху в определенном плановом периоде; формировать графики выполнения производственных заказов с учетом заданных производственных мощностей, и графики загрузки оборудования по календарным периодам планирования; формировать перечень производственных заказов, по которым расчетные сроки не соответствуют директивным срокам исполнения заказа.

Разработанный программный продукт был адаптирован для решения задач оптимального планирования процесса изготовления изделий в опытно-производстве АО "ОКБМ Африкантов" (г. Нижний Новгород).

### Заключение

Построены и исследованы математические модели, формализующие проблему оптимального пла-

нирования (объемного, объемно-календарного и сменно-суточного) для предприятий с единичным и мелкосерийным характером производства. Разработаны алгоритмы решения задач оптимального планирования, которые легли в основу созданных программных продуктов, внедренных в эксплуатацию на предприятиях ГК "Росатом". С учетом импортозамещения и в связи с переходом на отечественные программные продукты в настоящее время ведутся работы по переносу и развитию созданного программного продукта на отечественные платформы (на базе операционных систем ОС Astra Linux и Синергия, СУБД Postgres).

### Список литературы

1. **Graham R. L., Lawler E. L., Lenstra J. K., Rinnooy Kan A. H. G.** Optimization and Approximation in Deterministic Sequencing and Scheduling: a Survey // Proceedings of the Advanced Research Institute on Discrete Optimization and Systems Applications of the Systems Science Panel of NATO and of the Discrete Optimization Symposium. Elsevier. 1979. Vol. 5. P. 287—326.
2. **Gairing M., Lucking T., Mavronicolas M., Monien B.** Computing Nash Equilibria for Scheduling on Restricted Parallel Links // Proc. 36th Annual ACM Sympos. Theory Comput. 2004. P. 613—622.
3. **Chen B., Potts C. N., Woeginger G. J.** A review of machine scheduling. Complexity, algorithms and approximability / Handbook of Combinatorial Optimization. Kluwer Academic Publishers. 1998. Vol. 3. P. 21—169.
4. **Gunawan A., Ng K. M., Poh K. L.** Solving the teacher assignment-course scheduling problem by a hybrid algorithm // International Journal of Computer and Information Engineering. 2007. Vol. 1, N 2. P. 136—141.
5. **Танаев В. С., Шкурба В. В.** Введение в теорию расписаний. М.: Наука, 1975. 236 с.
6. **Танаев В. С., Гордон В. С., Шафранский Я. М.** Теория расписаний. Одностадийные системы. М.: Наука. 1984. 384 с.
7. **Лазарев А. А.** Модели и методы решения задач теории расписаний // Автоматика и телемеханика. 2014. № 7. С. 14—16.
8. **Батищев Д. И., Гудман Э. Д., Норенков И. П., Прилуцкий М. Х.** Метод декомпозиций для решения комбинаторных задач упорядочения и распределения ресурсов // Информационные технологии. 1997. № 1. С. 29—33.
9. **Батищев Д. И., Гудман Э. Д., Норенков И. П., Прилуцкий М. Х.** Метод комбинирования эвристик для решения комбинаторных задач упорядочения и распределения ресурсов // Информационные технологии. 1997. № 2. С. 29—32.
10. **Прилуцкий М. Х.** Распределение однородного ресурса в иерархических системах древовидной структуры // Труды международной конференции "Идентификация систем и задачи управления SICPRO 2000". Москва. 26—28 сентября 2000 г. Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН. М.: Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, 2000. С. 2038—2049.
11. **Прилуцкий М. Х.** Многокритериальные многоиндексные задачи объемно-календарного планирования // Известия Академии наук. Теория и системы управления. 2007. № 1. С. 78—82.
12. **Афраймович Л. Г., Власов В. С., Куликов М. С., Прилуцкий М. Х., Седаков Д. В., Старостин Н. В., Филимонов А. В.** Задачи планирования и оперативного управления процессом изготовления интегральных схем с микронными и субмикронными топологическими нормами // Автоматизация в промышленности. 2014. № 8. С. 17—21.
13. **Власов В. С., Прилуцкий М. Х., Афраймович Л. Г.** и др. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ "Программное обеспечение планирования процесса изготовления интегральных схем с субмикронными топологическими нормами "Кристалл-С". Правообладатель ФГУП "ФНПЦ НИИИС им. Ю. Е. Седакова" (Нижний Новгород). № 2015615139, 2015.
14. **Прилуцкий М. Х., Афраймович Л. Г., Старостин Н. В.** и др. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ "Программное обеспечение "ЗАКАЗ-О". Правообладатель ФГУП "РФЯЦ ВНИИЭФ" (г. Саров). № 2010614640, 2010.

**M. Kh. Prilutskii**, D. Sc., Professor, Head of a Chair, e-mail: pril@iani.unn.ru,  
Lobachevsky National Research State University of Nizhny Novgorod,  
**V. S. Vlasov**, Ph. D. in technical sciences, research department head,  
FSUE "FRPC NIIS named after Yu. Ye. Sedakov", e-mail: vlasov\_nn@mail.ru,  
**O. V. Krivosheev**, deputy director on information technologies and business-processes,  
FSUE "RFNC VNIIEF", e-mail: OIVKrivosheev@rosatom.ru

## Optimal Scheduling Problems as Resources Distribution in Network Canonical Structures Problems

We consider production systems functioning on the following scheme. A specified scope of interdependent activities is to be executed at discrete time moments (scheduling cycles) with available system resources required for their fulfillment. The resources are classified by expiration date as being stored (materials, raw materials, semi-finished items), not being stocked (manpower, equipment run time fund) and being partially stored (chemicals, perishable goods). The resources can be consumed with different intensity that affects work execution duration. The considered systems are peculiar not only for the fact that the particular work execution may result in consuming resources necessary for its realization but in manufacturing resources (semi-finished items) subsequently used to accomplish the activities. The described scheme complies with functioning conditions of production systems characterized as single- part or small-lot production.

Resource distribution in the considered systems is simulated by a network canonical structure — directed weighted loop-free and circuit-free graphs the elements of which meet the particular characteristics. A problem of optimal scheduling is to define a strategy to distribute the resources between activities and a specified work scope execution sequence in the course of its realization some overall indexes of the system functioning reach extreme values.

To solve the indicated problem decision algorithms have been implemented on the basis of which a C#.NET (Windows operating system family) software has been developed. The software is implemented in permanent operation while scheduling microelectronic device production process in FSUE "FRPC NIIS named after Yu. Ye. Sedakov" (Nizhny Novgorod city), solving problems of interplant scheduling for FSUE "RFNC VNIIEF" (Sarov city) as well as while realizing an optimal scheduling of items manufacturing process in JSC "OKBM Afrikantov" (Nizhny Novgorod city).

**Keywords:** mathematical model, network canonical structure, output scheduling, output-calendar scheduling, shift-daily scheduling, linear transfer equation system, discrete controlled system, optimal strategy, front algorithm

### References

1. **Graham R. L., Lawler E. L., Lenstra, J. K., Rinnooy Kan A. H. G.** Optimization and Approximation in Deterministic Sequencing and Scheduling: a Survey, *Proceedings of the Advanced Research Institute on Discrete Optimization and Systems Applications of the Systems Science Panel of NATO and of the Discrete Optimization Symposium*. Elsevier, 1979, pp. 287–326.
2. **Gairing M., Lucking T., Mavronicolas M., Monien B.** Computing Nash Equilibria for Scheduling on Restricted Parallel Links, *Proc. 36th Annual ACM Sympos. Theory Comput.*, 2004, pp. 613–622.
3. **Chen B., Potts C. N., Woeginger G. J.** *A review of machine scheduling. Complexity, algorithms and approximability*, Handbook of Combinatorial Optimization. Kluwer Academic Publishers, 1998, vol. 3, pp. 21–169.
4. **Gunawan A., Ng K. M., Poh K. L.** Solving the teacher assignment-course scheduling problem by a hybrid algorithm, *International Journal of Computer and Information Engineering*, 2007, vol. 1, no. 2, pp. 136–141. (in Russian).
5. **Tanaev V. S., Shkurba V. V.** *Vvedenie v teoriyu raspisanij* (Introduction to the scheduling theory), Moscow, Nauka, 1975, 236 p. (in Russian).
6. **Tanaev V. S., Gordon V. S., Shafranskij Ja. M.** *Teoriya raspisanij. Odnostadijnye sistemy* (Scheduling theory. One-stage systems), Moscow, Nauka, 1984, 384 p. (in Russian).
7. **Lazarev A. A.** *Modeli i metody reshenija zadach teorii raspisanij* (Models and methods for solving scheduling problems), *Avtomatika i telemekhanika*, 2014, no. 7, pp. 14–16. (in Russian).
8. **Batishhev D. I., Gudman E. D., Norenkov I. P., Prilutskii M. Kh.** *Metod dekompozicij dlja reshenija kombinatornyh zadach uporyadochenija i raspredelenija resursov* (The decomposition method for solving combinatorial problems of ordering and resource allocation), *Informacionnye tehnologii*, 1997, no. 1, pp. 29–33. (in Russian).
9. **Batishhev D. I., Gudman E. D., Norenkov I. P., Prilutskii M. Kh.** *Metod kombinirovanija jevristik dlja reshenija kombinatornyh zadach uporyadochenija i raspredelenija resursov* (A method of combining

heuristics for solving combinatorial problems of ordering and resource allocation), *Informacionnye tehnologii*, 1997, no. 2, pp. 29–32 (in Russian).

10. **Prilutskii M. Kh.** *Raspredelenie odnorodnogo resursa v ierarcheskikh sistemah drevovidnoj struktury* (Distribution of a homogeneous resource in hierarchical systems of a tree structure), *Trudy mezhdunarodnoj konferencii "Identifikacija sistem i zadachi upravlenija SICPRO 2000"*, Moscow 26–28 sentjabrja 2000. Institut problem upravlenija im V. A. Trapeznikova RAN. Moscow, Institut problem upravlenija im V. A. Trapeznikova RAN, 2000, pp. 2038–2049 (in Russian).

11. **Prilutskii M. Kh.** *Mnogokriterial'nye mnogoindeksnye zadachi ob'emno-kalendar'nogo planirovanija* (Multicriterial multi-index problems of volume-calendar planning), *Izvestiya akademii nauk. Teoriya i sistemy upravlenija*, 2007, no. 1, pp. 78–82. (in Russian).

12. **Afraimovich L. G., Vlasov V. S., Kulikov M. S., Prilutskij M. Kh., Sedakov D. V., Starostin N. V., Filimonov A. V.** *Zadachi planirovanija i operativnogo upravlenija processom izgotovlenija integral'nyh shem s mikronnymi i submikronnymi topologicheskimi normami* (Problems of planning and operational management of the process of manufacturing integrated circuits with micron and submicron topological norms), *Avtomatizacija v promyshlennosti*, 2014, no. 8, pp. 17–21 (in Russian).

13. **Vlasov V. S., Prilutskij M. Kh., Afraimovich L. G.** et al. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii program dlja JeVM "Programnoe obespechenie planirovanija processa izgotovlenija integral'nyh shem s submikronnymi topologicheskimi normami "Crystal-S"* (Certificate of state registration of the computer program "Software for planning the process of manufacturing integrated circuits with submicron topological standards "Crystal-S"). *Pravoobladatel' FGUP NIIS im Yu. E. Sedakova* (Nizhny Novgorod), no. 2015615139, 2015 (in Russian).

14. **Prilutskij M. Kh., Afraimovich L. G., Starostin N. V.** et al. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii program dlja JeVM "Programnoe obespechenie "Zakaz-O"* (Certificate of state registration of the computer program "Software "ORDER-O") *Pravoobladatel' FGUP RFJaC-VNIIEF* (Sarov), no. 2010614640, 2010 (in Russian).

# ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ И ИЗОБРАЖЕНИЙ DIGITAL PROCESSING OF SIGNALS AND IMAGES

УДК 621.396

Б. И. Филиппов, канд. техн. наук, доц., e-mail: filippov-boris@rambler.ru,  
ФГБОУ ВПО Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск

## Передача телеметрической информации по гидроакустическому каналу связи

*Рассматривается передача телеметрической информации в гидроакустическом канале связи. Главной задачей является выбор метода, обеспечивающего передачу цифровой информации с наивысшей скоростью, при заданной помехоустойчивости и приемлемых затратах энергии. В целях экономии вычислительных ресурсов и аппаратных средств предлагается выполнять только одну-две итерации исправления ошибок, а оставшиеся ошибки запрашивать у донной станции по каналу обратной связи.*

**Ключевые слова:** гидроакустический канал связи, энергетические затраты, система с решающей обратной связью и ожиданием, помехоустойчивое кодирование

### Введение

В соответствии с требованиями, предъявляемыми к аппаратуре гидроакустического канала связи (ГАКС), предусматривается передача из гидроакустической донной автономной станции (ГДАС) цифровой информации об информационных параметрах зарегистрированных событий. Принимая во внимание предполагаемый объем передачи, основным вопросом, стоящим перед разработчиком, является выбор метода, обеспечивающего передачу цифровой информации с наивысшей скоростью, при заданной помехоустойчивости и приемлемых затратах энергии.

Известно, что скорость передачи в канале связи ограничивается, в первую очередь, линейными искажениями сигналов, возникающими вследствие рассеяния в тракте и влияния избирательных цепей аппаратуры. Эти искажения проявляются в виде "заваливания" фронтов, увеличения длительности сигналов, что приводит к взаимному наложению сигналов друг на друга и появлению межсимвольной помехи. В технике связи для борьбы с межсимвольной помехой выполняют корректирование амплитудно-частотной и фазочастотной характеристик канала [1, 2]. Для этой цели на его выходе включают адаптивный гармонический корректор. Сложность корректоров велика и они обеспечивают корректирование канала в относительно небольшом диапазоне изменения его характеристик.

Применение в гидроакустическом канале связи направленных антенн уменьшает влияние помех и улучшает энергетические характеристики аппаратуры [3, 4]. Но у направленных гидроакустических антенн фазовые характеристики отличаются высо-

кой неравномерностью и имеют точки разрыва [5]. Это является препятствием для передачи в аппаратуре ГАКС цифровой информации с высокой скоростью путем использования сигналов малой длительности и применения адаптивных гармонических корректоров.

Проведенные в Сибирском государственном университете телекоммуникаций и информатики (СибГУТИ) исследования показали, что в гидроакустическом канале связи вертикальной ориентации увеличение скорости может быть достигнуто при передаче цифровой информации на нескольких ортогональных поднесущих [6]. Суть метода заключается в следующем. В полосе пропускания гидроакустических антенн организуется  $n$  параллельных подканалов передачи. Последовательный информационный поток делится на эти  $n$  подканалов. Скорость передачи в каждом из подканалов выбирают такой, чтобы не сказывалось влияние межсимвольной помехи. Передача информации в подканалах осуществляется методом относительной фазовой модуляции; поднесущие в подканалах взаимно ортогональны. В процессе передачи сигнальные спектры в подканалах взаимно перекрываются. В силу ортогональности поднесущих на приемной стороне корреляционным способом осуществляется разделение сигналов по подканалам, их отдельная демодуляция. Демодулированные в отдельных подканалах символы преобразуются в последовательный вид и выдаются получателю.

### Постановка задачи и решение

Мощность группового сигнала  $P_{гр}$  равна сумме мощностей сигналов в подканалах  $P_{гр} = nP_k$ . При этом

затраты энергии  $E_{гр}$  на передачу цифровой информации объемом  $V_{ц.и}$  бит будут равны

$$E_{гр} = P_{гр} \frac{V_{ц.и}}{\eta n v} = P_k \frac{V_{ц.и}}{\eta v},$$

где  $v$  — скорость передачи в одном подканале;  $\eta$  — коэффициент полезного действия усилителя мощности.

В силу того что групповой сигнал формируется линейным сложением канальных сигналов, его усиление должен осуществлять линейный усилитель мощности. Даже без учета пик-фактора группового сигнала максимальное значение коэффициента полезного действия усилителя мощности  $\eta \leq 0,5$  (двухтактный усилитель класса В). Тогда

$$E_{гр} = P_k \frac{V_{ц.и}}{0,5v}. \quad (1)$$

Вместе с тем при организации передачи такого же объема цифровой информации  $V_{ц.и}$  одноканальным последовательным методом со скоростью  $v$  для усиления можно применить нелинейный усилитель мощности, например двухтактный усилитель класса Д, минимальный коэффициент полезного действия усилителя мощности которого  $\eta \approx (0,7...0,8)$ . Затраты энергии  $E$  на передачу цифровой информации последовательным методом оцениваются соотношением

$$E \leq P_k \frac{V_{ц.и}}{0,7v}. \quad (2)$$

Сравнение затрат энергии на передачу одинакового объема цифровой информации последовательным и параллельным методами показывает, что эффективность использования энергии при передаче цифровой информации последовательным методом со скоростью  $v$  по крайней мере на 40 % выше, чем у высокоскоростного параллельного метода. А при учете пик-фактора группового сигнала при параллельном методе передачи его проигрыш по сравнению с последовательным методом увеличивается. По этой причине в последующих разработках передачи цифровой информации из донной станции на судно осуществляли через подсистему канала управления, а для уменьшения времени занятия канала данные измерений перед передачей подвергали предварительной обработке и сжатию в ЭВМ донной станции.

Такое же решение предлагается принять в разрабатываемой аппаратуре ГАКС: передачу цифровой информации из ГДАС в судовой приемно-обработывающий комплекс (СПОК) осуществлять по подсистеме канала управления. Для повышения помехозащищенности передачи цифровой информации в СПОК следует использовать сверточное кодирование в сочетании с исправлением ошибок многокаскадным пороговым декодером. При использовании скорости сверточного кода  $R = 7/8$  средняя скорость передачи  $v_{ср}$  оценивается значением  $v_{ср} \approx 0,85v$ .

Подставляя эту оценку в соотношение (2), получаем оценку потребления энергии от автономного источника питания ГДАС на передачу объема цифровой информации  $V_{ц.и}$ :

$$E \leq P_k \frac{V_{ц.и}}{0,7 \cdot 0,85v} = 1,68 P_k \frac{V_{ц.и}}{v}. \quad (3)$$

При работе на предельных глубинах (до 6000 м)  $P_k \approx 24$  Вт. При скорости передачи в канале управления равной  $v = 200$  бит/с время передачи  $T_{пер}$  объема цифровой информации  $V_{ц.и} = 2$  Мбайт оценивается значением

$$T_{пер} = \frac{V_{ц.и}}{0,85v} = 1,68 \cdot \frac{3 \cdot 8 \cdot 10^6}{200} \approx 37,3 \text{ ч,}$$

а затраты энергии  $E \approx 3,226$  МДж. При скорости передачи  $v = 400$  бит/с —  $T_{пер} \approx 18,7$  ч,  $E \approx 1,613$  МДж.

Полученные данные показывают, что перед передачей по гидроакустическому каналу связи данные измерения должны подвергаться предварительной обработке и сжатию.

Оценим возможность скоростной передачи цифровой информации из ГДАС во всплывающие модули системы спутниковой связи (ВМССС) [7]. Мощность  $P_k$  оценивается значением 0,1 Вт. Подставляя в выражение (1) значения  $P_k = 0,1$  Вт,  $V_{ц.и} = 2$  Мбайт,  $v = 200$  бит/с получаем, что затраты энергии непосредственно на передачу цифровой информации в ВМССС оцениваются значением  $E_{гр} = 2,353$  кДж. Если предположить, что скорость передачи в групповом канале соответствует скорости передачи  $lv = 1600$  бит/с, то получим время передачи  $T_{пер} \approx 0,41$  ч.

Анализ показывает, что снижение размеров приемного устройства может быть достигнуто за счет использования сигнального процессора. Однако даже в этом случае остается нерешенной задача построения приемника с низким потреблением. Во-первых, сам сигнальный процессор даже в режиме ожидания потребляет около 100 мВт. Во-вторых, главное, не удастся сократить объем блока аналоговой обработки сигнала. По самым скромным оценкам для реализации блока аналоговой обработки необходимо не менее 20 скоростных операционных усилителей с потреблением 40...50 мВт каждый. В этом случае суммарное потребление приемного устройства оценивается в 1...1,2 Вт. По этой причине предлагается оборудовать ВМССС помимо приемника информационного канала приемопередатчиком подсистемы канала управления и включать питание приемника только на время приема цифровой информации из ГДАС. Но при таком решении на прием цифровой информации в ВМССС необходимо предусмотреть запас энергии  $\approx 1,8$  кДж.

Если для передачи цифровой информации использовать приемопередатчик канала управления, потребление энергии может быть снижено в 6—7 раз.

На основании изложенного, представляется целесообразным передачу из ГДАС цифровой ин-

формации об информационных параметрах зарегистрированных событий и на судно, и в ВМССС осуществлять по каналу управления после их предварительной обработки и сжатия в ГДАС.

Аппаратура ГАКС, предназначенная для управления и передачи информации с ГДАС на СПОК, имеет прямой и обратный каналы гидроакустической связи. Очевидно, что аналогичные решения должны быть использованы и для организации канала передачи информации от ГДАС на ВМССС. В пользу такого решения говорит и возможность возникновения исключительных ситуаций, когда может возникнуть необходимость непосредственного управления ВМССС с судового комплекта ГАКС.

Однако, учитывая небольшую протяженность гидроакустического канала ГДАС — ВМССС ( $\leq 100$  м) и меньший уровень помех, канал будет иметь лучшие (в сравнении с каналом передачи информации ГДАС — СПОК) энергетические и информационные характеристики. Мощность передатчиков ГАКС прямого канала на ГДАС и обратного канала передачи квитанций может быть и должна быть уменьшена. Расстояние уменьшается в  $6000 : 100 = 60$  раз, следовательно, с учетом условий распространения звука в воде мощность, излучаемая передатчиками, может быть уменьшена, по крайней мере, на 30 дБ, т. е. до  $(0,1 \dots 0,5)$  Вт. Излишняя мощность излучения передатчиков ГАКС является вредной не только вследствие больших энергетических затрат на передачу информации, но это может резко уменьшить помехоустойчивость канала, ввиду возникновения многолучевости распространения сигнала, обусловленного отражением от дна и неоднородностями окружающего пространства, в том числе других близкорасположенных ВМССС [3]. Учитывая возможность отражения сигнала от соседних ВМССС и экранирующего эффекта нижних ВМССС в гирлянде, целесообразно передавать информацию вначале на нижний ВМССС гирлянды, а после его всплытия на следующий и т. д. [7]. Если такой порядок взаимодействия ГДАС и ВМССС невозможен по каким-либо причинам (например, способа подвески ВМССС, расписания всплытия ВМССС или режима взаимодействия ГДАС и ВМССС), то скорость передачи информации по ГАКС от ГДАС на ВМССС будет жестко ограничена многолучевостью и составит

$$v < \frac{c_0}{\Delta h},$$

где  $\Delta h$  — расстояние между ВМССС в гирлянде;  $c_0$  — скорость звука в воде.

Например, при  $\Delta h = 5$  м и  $c_0 = 1500$  м/с,  $v < 300$  бит/с.

Для повышения скорости передачи необходимо принимать меры, ослабляющие отраженные сигналы: использовать специальную схему расположения ВМССС в гирлянде и применять звукопоглощающие материалы на корпусах ВМССС. Как

и при передаче информации от ГДАС на СПОК в гидроакустическом канале ГДАС — ВМССС, передача цифровой информации предполагается блоками с подтверждением приема блока по обратному каналу (система передачи с решающей обратной связью и ожиданием: РОС — ОЖ). Следующий информационный блок передается только после подтверждения приема предыдущего. Ожидание и переспрос снижают скорость передачи информации в сравнении со скоростью передачи кодовых символов в канале  $v_{к.с.}$ .

Для определения степени снижения средней скорости передачи  $v_{ср}$  в сравнении с  $v_{к.с.}$  найдем среднее время передачи информационного блока в системе РОС — ОЖ:

$$\begin{aligned} T_{\text{бл.ср.}} &= (T_{\text{бл}} + t_{\text{ож}}) + (T_{\text{бл}} + t_{\text{ож}})P_{\text{о.о}} + \\ &+ (T_{\text{бл}} + t_{\text{ож}})P_{\text{о.о}}^2 + \dots = (T_{\text{бл}} + t_{\text{ож}}) \left( 1 + \frac{P_{\text{о.о}}}{1 - P_{\text{о.о}}} \right) = \\ &= T_{\text{бл}} \left( 1 + \frac{P_{\text{о.о}}}{1 - P_{\text{о.о}}} \right) \left( 1 + \frac{t_{\text{ож}}}{T_{\text{бл}}} \right), \end{aligned}$$

где  $T_{\text{бл}} = N \cdot T$  — длительность информационного блока;  $N$  — число кодовых символов в блоке;  $T = 1/v$ ;  $t_{\text{ож}}$  — время ожидания;  $P_{\text{о.о}}$  — вероятность обнаружения ошибки в блоке.

Средняя скорость передачи информации

$$v_{\text{ср}} = \frac{N}{T_{\text{бл}}} = \frac{v}{\left( 1 + \frac{P_{\text{о.о}}}{1 - P_{\text{о.о}}} \right) \left( 1 + \frac{t_{\text{ож}}}{NT} \right)}; \quad \frac{v_{\text{ср}}}{v} = \frac{1}{\gamma};$$

где  $\gamma = \frac{1}{\left( 1 + \frac{P_{\text{о.о}}}{1 - P_{\text{о.о}}} \right) \left( 1 + \frac{t_{\text{ож}}}{NT} \right)}$ ;  $\gamma$  — коэффициент

снижения скорости передачи вследствие ожидания и переспроса ( $\gamma \geq 1$ ).

Таким образом,  $\gamma$  является функцией трех величин: вероятности обнаружения ошибок в блоке, длины блока и времени ожидания.

Время ожидания  $t_{\text{ож}} \approx t_y$  — времени управления в гидроакустическом канале вертикальной ориентации. В гидроакустическом канале ГДАС — ВМССС время управления

$$t_y = 2\Delta t + \Delta\tau,$$

где  $\Delta t = l/c_0$  — время распространения звука в канале связи;  $\Delta\tau$  — время обмена командами и квитанциями;  $\Delta\tau = 2 \cdot (M + 1)n/v$ ;  $n$  — число символов в кодовой комбинации кодового слова управления;  $M$  — число повторений кодового слова управления.

Тогда

$$t_y = 2 \frac{100}{1500} + 2 \frac{(6+1) \cdot 67}{200} = 2 \cdot 0,067 + 4,76 = 4,9 \text{ с,}$$

при  $v = 200$  бит/с;  $t_y = 2,51$  с при  $v = 400$  бит/с.

Вероятность обнаружения ошибки в ГАКС определяется вероятностью искажения кодового сим-

вола, которая при выбранной мощности передаваемых сигналов и максимальной дальности равна  $P \leq 10^{-3}$ , и числом символов в информационном блоке  $N$ :

$$P_{o.o} \approx P_N = 1 - (1 - P)^N, \text{ когда } P \ll 1.$$

Тогда при  $N = 1000$ :

$$\begin{aligned} P_{o.o} &= 1 - (1 - 0,001)^{1000} = 0,63, \\ \gamma &= 5,35 \text{ (при } v = 200 \text{ бит/с),} \\ v_{cp} &= 0,187v, \\ \gamma &= 5,4 \text{ (при } v = 400 \text{ бит/с),} \\ v_{cp} &= 0,185v. \end{aligned}$$

Как видим, увеличение скорости мало влияет на потери средней скорости. Если увеличить длину блока до  $N = 10^4$ , то  $P_{o.o} \approx 1 - 4,5 \cdot 10^{-5}$ ; при  $v = 200$  бит/с,  $\gamma > 5 \cdot 10^4$ , а  $v_{cp} < 2 \cdot 10^{-5} \cdot v$ .

Потери скорости передачи информации в канале ГДАС — СПОК на ожидание и переспрос будут еще большими, учитывая увеличение времени управления  $t_y$  с увеличением дальности передачи.

Эти расчеты показывают неэффективность применения в ГАКС простого переспроса с ожиданием. Необходимо усложнить алгоритм обработки информационных блоков в приемнике в целях уменьшения вероятности обнаружения ошибки  $P_{o.o}$ :

— ошибки малой кратности необходимо исправлять за счет избыточности корректирующего кода, используемого для передачи информационного блока;

— ошибки большой кратности обнаруживаются и запрашиваются по каналу обратной связи.

Для определения максимальной кратности исправляемых ошибок и, следовательно, выбора корректирующего кода целесообразно потребовать, чтобы переспрос информационного блока с вероятностью  $P_{доп} = 0,85 \dots 0,9$  происходил не менее чем через 10 блоков. В первом приближении распределение интервалов между переспросами в канале с независимыми ошибками можно считать показательным, тогда

$$P_{доп}(i) = \exp(-i/P_{o.o}),$$

где  $i = 10$  — число блоков между переспросами.

Отсюда

$$P_{o.o} = -0,1 \cdot \ln P_{доп}(10) = -0,1 \cdot \ln 0,85 = 1,62 \cdot 10^{-2}.$$

Это позволяет практически устранить влияние переспроса на коэффициент  $\gamma$ , а следовательно, на уменьшение средней скорости передачи информации.

Если  $N = 1000$ , а  $P_{o.o доп} \leq 1,62 \cdot 10^{-2}$ , то при  $P = 10^{-3}$

$$\begin{aligned} P_{o.o} &= P_N - P_{исп} = 1 - (1 - P)^N - \\ &- \sum_{i=1}^{t_i} C_N^i P^i \cdot (1 - P)^{N-i} \leq P_{o.o доп}. \end{aligned}$$

Отсюда кратность исправляемых ошибок  $t_i \geq (3 \dots 4)$ .

Из теории помехоустойчивого кодирования известно, что для исправления ошибок кратности  $t_i$  корректирующий код должен иметь кодовое расстояние  $(2t_i + 1)$ , а число проверенных символов в блоке для большинства корректирующих кодов превышает кодовое расстояние по крайней мере в 2 раза. Следовательно, информационный блок из  $N = 1000$  символов должен иметь не менее 20 проверочных символов.

Можно показать, что при  $N = 10^4$  символов, необходимо будет исправлять не менее 40 ошибок, а блок должен содержать не менее 200 проверочных символов.

В дальнейшем будем считать, что используемый корректирующий код должен иметь избыточность около 10 % ( $k/N = 0,9$ ;  $k$  — число информационных символов в блоке).

Определим потери скорости передачи при условии, что  $P_{o.o} = 1,6 \cdot 10^{-2}$  и используется корректирующий код с частичным исправлением ошибок:

$$v_{cp} = \frac{k}{N} \frac{v}{\gamma}.$$

При  $N = 1000$ ,  $v = 200$  бит/с;  $v_{cp} \approx 0,451v$ ,

при  $N = 10\ 000$ ,  $v = 200$  бит/с;  $v_{cp} \approx 0,82v$ ,

при  $N = 20\ 000$ ,  $v = 200$  бит/с;  $v_{cp} \approx 0,85v$ .

Аналогичный результат получается и при скорости передачи  $v = 400$  бит/с.

Таким образом, при частичном исправлении ошибок длина блока  $N$  должна быть  $N \geq 10^4$  символов, иначе потери времени на ожидание приводят к большому снижению скорости передачи информации в ГАКС. В принципе для канала передачи информации ГДАС — ВМСС скорость сверху ограничивается только сложностью реализации оборудования (увеличивается объем ОЗУ для хранения блока во время анализа).

Однако в канале передачи информации ГДАС — СПОК длина  $N$  ограничена сверху максимальной длительностью сеанса связи  $N_{max}$ .

Определим  $N_{max}$  для граничных условий: радиус зоны связи на поверхности моря  $r_{min} = 100$  м (0,5 минимальной глубины постановки ГДАС), скорость движения судна  $v_c \approx 1$  м/с ( $\sim 2$  узла).

Тогда

$$N_{max} = \frac{r_{min}}{v_c} \frac{v}{\left(1 + \frac{t_y}{N_{max} T}\right)}, \text{ откуда}$$

$$N_{max} = \left(\frac{r_{min}}{v_c} - t_y\right) v = \left(\frac{100}{1} - 10\right) \cdot 200 = 18\ 000 \text{ бит.}$$

## Заключение

Учитывая общность алгоритма передачи информации в ГАКС на СПОК и на ВМСС, выберем длину блока, кратную степени двойки:

$$N = 2^{14} = 16\,384 \text{ бит.}$$

Для помехоустойчивого кодирования информационного блока используем самоортогональный сверточный код [8], скорость кода  $R = 7/8$  (избыточность 0,125), имеющий семь порождающих многочленов вида

$$g_1(x) = 1 + x^{42} + x^{87} + x^{90} + x^{106} + x^{118};$$

$$g_2(x) = 1 + x^{49} + x^{92} + x^{115} + x^{117} + x^{124};$$

$$g_3(x) = 1 + x + x^{15} + x^{36} + x^{73} + x^{120};$$

$$g_4(x) = 1 + x^{20} + x^{30} + x^{38} + x^{71} + x^{123};$$

$$g_5(x) = 1 + x^{55} + x^{82} + x^{111} + x^{116} + x^{122};$$

$$g_6(x) = 1 + x^{62} + x^{86} + x^{98} + x^{102} + x^{125};$$

$$g_7(x) = 1 + x^3 + x^{22} + x^{52} + x^{78} + x^{146}.$$

При итерационном пороговом декодировании этого кода [9] в канале с независимыми ошибками с вероятностью  $P = 10^{-3}$  достигается вероятность ошибки декодирования  $P_d < 10^{-5}$ .

На ВМССС в целях экономии вычислительных ресурсов и аппаратных средств предлагается вы-

полнять только одну-две итерации исправления ошибок, оставшиеся ошибки запрашивать у ГДАС по каналу обратной связи. Оценка вероятности ошибки декодирования после двух итераций равна  $P_{д2} \approx 1,2 \cdot 10^{-5}$ , что может считаться достаточным.

## Список литературы

1. **Былянки П., Ингрэм Д.** Цифровые системы передачи / Пер. с англ. М.: Связь, 1980. 360 с.
2. **Данилов Б. С., Штейнбок М. Г.** Однополосная передача цифровых сигналов. М.: Связь, 1974. 136 с.
3. **Филиппов Б. И., Чернецкий Г. А.** Анализ статистических характеристик сигналов и помех в гидроакустических каналах связи // Вестник АГТУ. Серия Управление, вычислительная техника и информатика. 2015. № 3. С. 78–83.
4. **Филиппов Б. И.** Энергетический расчет гидроакустических линий связи // Вестник АГТУ. Серия Управление, вычислительная техника и информатика. 2016. № 3. С. 67–77.
5. **Смарышев М. Д., Добровольский Ю. Ю.** Гидроакустические антенны. Справочник по расчету направленных свойств гидроакустических антенн. Л.: Судостроение, 1984. 304 с.
6. **Арсентьев В. Г., Криволапов Г. И.** Некоторые результаты реализации подводных сетевых технологий в СибГУТИ // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2011. Т. 4, № 3. С. 129–134.
7. **Филиппов Б. И.** Протокол обмена сигналами в сети гидроакустических донных станций // Известия ВолгГТУ. Серия Электроника, измерительная техника, радиотехника и связь. 2015. № 11 (176). С. 104–111.
8. **Макаров А. А., Прибылов В. П.** Помехоустойчивое кодирование в системах телекоммуникаций: учеб. пособие. Новосибирск: Изд-во СибГУТИ, 2004. 141 с.
9. **Артемова О. А., Макаров А. А.** Устройство порогового декодирования сверточных кодов. Пат. РФ 2081513. Приоритет с 11.03.1993.

**B. I. Filippov**, Ph. D., Associate Professor, e-mail: filippov-boris@rambler.ru,  
Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk

## Transmission of Telemetry Information in a Hydroacoustic Communication Channels

*Telemetry information transfer in hydroacoustic channel considered. The main task is to choose a method that provides digital information transfer with the highest speed and defined noise immunity and acceptable energy costs. Use directional antennas in hydroacoustic channel to reduce noise impact and improve energy characteristics of equipment. But directional hydroacoustic antennas has phase characteristics with high irregularity and with points of discontinuity. It is a barrier for digital information transfer through hydroacoustic channel with high speed using short duration signal and applying adaptive harmonic correctors. Comparison of energy spent on transmission of same amount of information with consequent and parallel methods shows that energy efficiency using consecutive data transmission method with speed  $V$  is at least 40 % higher than using highspeed parallel method. Transmission of digital information from hydroacoustic underwater station to ship receiving-processing complex carry out through the sub-system of control channel. To increase the level of noise immunity of digital information transmission in ship receiving-processing complex, convolutional coding should be used in conjunction with a threshold decoder correcting errors multistage. Average transfer rate  $v_{cp}$  by using the convolutional code ( $R = 7/8$ )  $v_{cp} \approx 0,85v$ .*

*Transfer information from hydroacoustic underwater station to ship receiving-processing complex in channel "hydroacoustic underwater station — popup modules of satellite communication system" recommended with blocks with link acknowledgment on the reverse channel. On popup modules of satellite communication system, in order to save computing power and hardware is offered to perform one or two error correction iteration. Other errors need to request from hydroacoustic underwater station through the feedback channel, estimation of encoding error probability after two iterations equals to  $P_{д2} \approx 1,2 \cdot 10^{-5}$  and it considered to be sufficient.*

**Keywords:** hydroacoustic channel, energy costs, decision feedback and waiting system, noiseless coding

## References

1. **Bylanski P., Ingram D.** *Tsifrovye sistemy svyazi*, Moscow: Svyaz, 1980, 360 p. (in Russian).
2. **Danilov B. S., Shteynbok M. G.** *Odnopolosnaya peredacha tsifrovyykh signalov*, Moscow: Svyaz, 1974. 136 p. (in Russian).
3. **Filippov B. I., Chernetskiy G. A.** Analiz statisticheskikh kharakteristik signalov i pomekh v gidroakusticheskikh kanalakh svyazi. *Vestnik AGTU*, 2015, no. 3, pp. 78–83 (in Russian).
4. **Filippov B. I.** Energeticheskiy raschet gidroakusticheskikh liniy svyazi. *Vestnik AGTU*, 2016, no. 3, pp. 67–77 (in Russian).
5. **Smaryshev M. D., Dobrovolskiy Y. Y.** *Gidroakusticheskiye anteny. Spravochnik po raschetu napravlennykh svoystv gidroakusticheskikh antenn*, Leningrad: Sudostroyeniye, 1984. 304 p. (in Russian).
6. **Arsentyev V. G., Krivolapov G. I.** Nekotorye rezultaty realizatsii podvodnykh setevykh tekhnologiy v SibGUTI, *Fundamentalnaya i prikladnaya gidrofizika*, 2011, vol. 4, no. 3, pp. 129–134 (in Russian).
7. **Filippov B. I.** Protokol obmena signalami v seti gidroakusticheskikh donnykh stantsiy, *Izvestiya VolgGTU*, 2015, no. 176, pp. 104–111 (in Russian).
8. **Makarov A. A., Pribylov V. P.** *Pomekhoustoychivoye kodirovaniye v sistemakh telekommunikatsiy*, Uchebnoye posobiye, Novosibirsk, Sib., 2004, 141 p. (in Russian).
9. **Artemova O. A., Makarov A. A.** Ustroystvo porogovogo dekodirovaniya svertochnykh kodov. RF Patent № 2081513 (in Russian).

УДК 004.932.2

**А. В. Терехин**, канд. техн. наук, доц., e-mail: terehin\_murom@mail.ru,  
Муромский институт (филиал) ФГБОУ ВО "Владимирский государственный университет  
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых", г. Муром

## Подход к классификации невыпуклых проекций трехмерных объектов по диагональным отрезкам с использованием кортежей

*Исследование направлено на решение задачи классификации проекций трехмерных объектов в системах автоматического распознавания. Описывается модель классификации плоских невыпуклых изображений по их форме. В качестве критериев классификации в данной модели используются комбинации диагональных отрезков в четырех квадрантах описанного прямоугольника изображения объекта наблюдения.*

**Ключевые слова:** система автоматического распознавания, трехмерный объект, модель классификации, идентификация, плоские невыпуклые изображения, диагональные признаки формы, распознавание образов, анализ изображений, диагональный отрезок, кортежи

### Введение

Автоматизация производства наступила в 40–50-х годах прошлого века. Активное исследование и разработки в данной области были связаны с появлением спроса на сборочные узлы и конвейерные линии. Появление первых роботов на производстве ознаменовало качественно новый этап в развитии человеко-машинных систем, что способствовало развитию машинного зрения, выполняющего функции распознавания предметов, расположенных перед манипулятором. Исследования в этой области стали фундаментом для современных систем автоматического распознавания (САР) в задачах идентификации различных трехмерных объектов.

Разрабатываемые в настоящее время САР трехмерных объектов базируются в основном на применении одного из двух подходов. Первый заключается в получении пространственных характеристик по одному изображению объекта. Обычно такие системы применяют для контроля качества однотипных объектов, движущихся по конвейеру в фиксированном положении (проверка на наличие внешних дефектов). Второй подход заключается в

использовании дополнительного источника пространственной информации. Таким источником могут выступать лазерные дальнометры, дополнительный видеодатчик (в системах, построенных на основе алгоритмов стереометрии) и 2D-лазеры, подсвечивающие полосы вдоль равномерно движущегося объекта [1–3].

В задачах промышленной сборки наиболее часто применяют системы, построенные на основе второго подхода. В этих системах распознавание осуществляется с использованием трехмерных моделей (эталонов). Их преимущество заключается в возможности сопоставления изображения проекции объекта, полученного с камеры, с его эталонным аналогом. Основными недостатками данных систем являются их сложность, дороговизна, значительное время на принятие решения. Также существующие системы требуют фиксированного положения детали либо используются для локализации дефектов на однотипных объектах на конвейере. При массовом производстве это крайне неудобно, но направление распознавания нескольких произвольно расположенных трехмерных объектов развито слабо и редко применяется из-за большого

числа ошибок, возникающих в сложных случаях, например, когда объекты имеют одинаковые характеристики у аналогичных проекций или когда с одного ракурса нельзя различить объекты, отличающиеся только формами боковых граней.

Ранее автором был разработан вектор инвариантных признаков для распознавания выпуклых изображений проекций трехмерных объектов (диагональные коэффициенты формы) [4, 5], а также САР трехмерных объектов, основанная на анализе изображений, получаемых с двух камер, расположенных под углом к сцене, и трехмерных моделей. Подробное описание такой САР представлено в работе [6]. Разработанные признаки [4, 5] позволяют классифицировать выпуклые изображения проекций трехмерных объектов, но на практике часто приходится иметь дело с изображениями произвольной формы (в том числе и невыпуклой), которые в процессе распознавания также необходимо классифицировать.

Точность идентификации объектов зависит от правильного выбора модели классификации. Также при разработке САР важным моментом является корректный выбор критериев классификации исследуемых объектов. На основе признаков [4, 5] были разработаны новые инвариантные признаки невыпуклых изображений проекций трехмерных объектов, при исследовании которых были выявлены закономерности, позволившие составить критерии для их классификации.

В данной статье речь пойдет о классификации изображений проекций объемных деталей для решения задачи идентификации трехмерных объектов на сборочных конвейерах. Задача сводится к определению типа объекта и его местоположения для того, чтобы робот-манипулятор автоматически выполнял процесс сборки по заранее заданной инструкции.

В связи с вышеизложенным разработка нового подхода к классификации плоских невыпуклых изображений является актуальной задачей.

### Алгоритм классификации невыпуклых проекций трехмерных объектов

Трехмерные объекты фиксируются на двумерной плоскости в виде проекций. Существует несколько способов проецирования, одним из которых является ортогональное (прямоугольное). В технических чертежах обычно приводят три ортогональные проекции трехмерной детали (виды): сверху, спереди и слева. На производстве различные объекты, требующие идентификации, обычно находятся в произвольном положении, поэтому необходимо рассматривать не только эти три проекции, но и противоположные (снизу, сзади, справа) [7].

Для того чтобы классифицировать изображения проекций трехмерных объектов, необходимо выполнить операции предварительной обработки

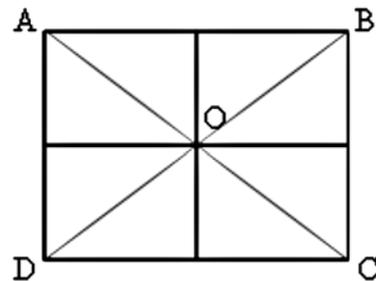


Рис. 1. Квадранты ОП

изображения, построения описанного прямоугольника (ОП) и диагональных отрезков [4, 5]. **Алгоритм классификации** представлен ниже.

**Шаг 1.** Получаем бинарное изображение.

**Шаг 2.** Строим вокруг изображения объекта описанный прямоугольник.

**Шаг 3.** Строим диагонали ОП.

**Шаг 4.** Строим уравнение прямой для каждой диагонали.

**Шаг 5.** Делим ОП на четыре квадранта, а диагонали ОП — на диагональные отрезки ОА, ОВ, ОС, ОD (рис. 1).

**Шаг 6.** Формируем кортежи для каждого диагонального отрезка.

Пусть  $a$  — кортеж, элементы которого определяют тип фрагмента диагонального отрезка:

0 — это фон, множество связных точек фона, лежащих на диагональном отрезке;

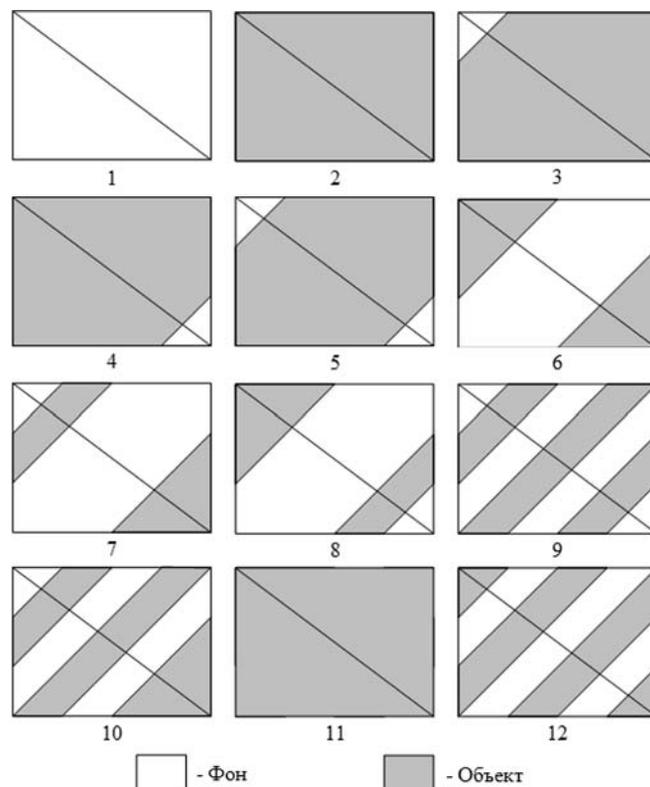


Рис. 2. Типы квадрантов ОП невыпуклого изображения объекта

$I$  — это объект, множество связанных точек объекта, лежащих на диагональном отрезке;

$$a = (a_1, a_2, \dots, a_n),$$

где  $a_i \in [0, 1], i = 1, \dots, n,$

$$S_i = \sum_i a_i.$$

**Шаг 7.** Анализируем кортежи, определяем класс квадранта (рис. 2).

Кортежи, сформированные для диагональных отрезков ОП в каждом из его квадрантов, позволяют классифицировать различные невыпуклые изображения проекций трехмерных объектов. Общая схема классификации каждого квадранта представлена на рис. 3, где

QBR — квадрант ОП;

VBR — вершина ОП;

CBR — центр ОП;

VBR и CBR указывают на то, какой из концов диагонального отрезка считать началом отсчета при классификации;

Bgr — фон;

Obj — объект;

Bgr и Obj обозначают первый элемент кортежа;

$S_i$  — сумма элементов кортежа (фактически это число фрагментов диагонального отрезка, принадлежащих объекту).

Если  $S_i = 0$ , то диагональный отрезок ни разу не пересекает объект.

Если  $S_i = 1$ , то диагональный отрезок один раз пересекает объект.

Если  $S_i = n$ , то диагональный отрезок  $n$  раз пересекает объект.

Для удобства расчетов считается, что начало диагонального отрезка — всегда центр ОП, а конец — вершина.

### Эксперименты

Для проверки предложенной модели была разработана программа на ЭВМ и проведены эксперименты на тестовых объектах. В основу системы были положены алгоритмы и подходы, разработанные автором [4–6, 8–11]. В экспериментах рассматривались семь плоских геометрических фигур (рис. 4, а), восемь различных трехмерных объектов (рис. 4, б) по шесть ортогональных проекций у каждого.

Объем экспериментальной выборки для фигур составил 16 000 экземпляров (по 2000 каждого типа фигур).

Объем экспериментальной выборки изображений ортогональных проекций трехмерных объектов

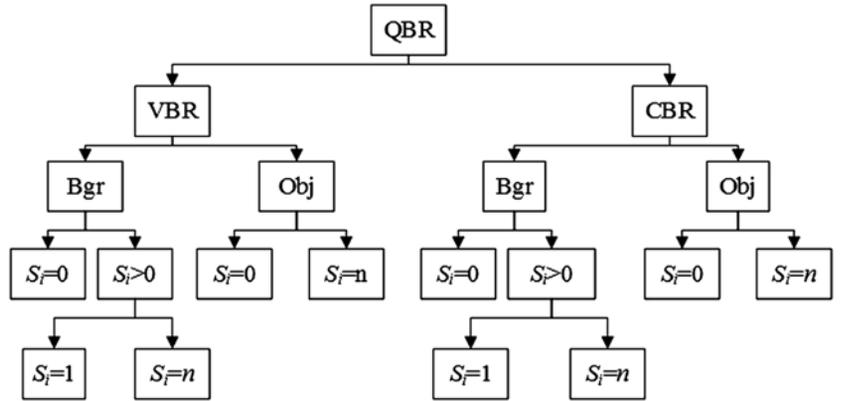


Рис. 3. Схема классификации объектов по квадрантам и диагональным отрезкам ОП

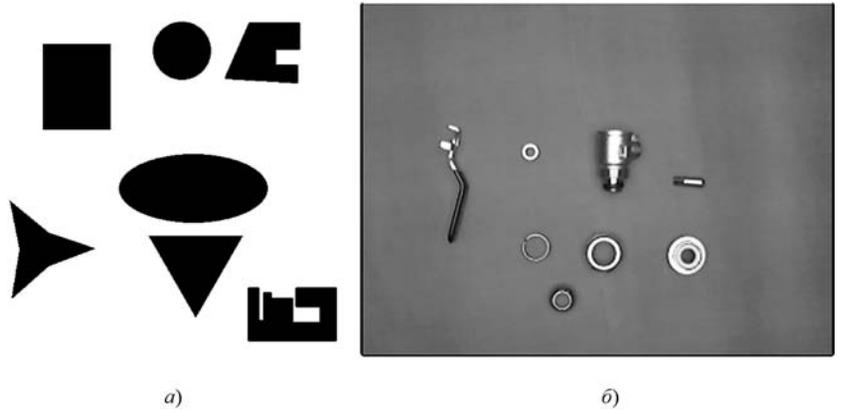


Рис. 4. Тестовые изображения плоских геометрических фигур и трехмерных объектов

составил 96 000 изображений (6 проекций 8 объектов генерировались по 2000 раз).

Для проведения экспериментов был разработан макет системы автоматического распознавания (рис. 5). Он представляет собой каркасную струк-

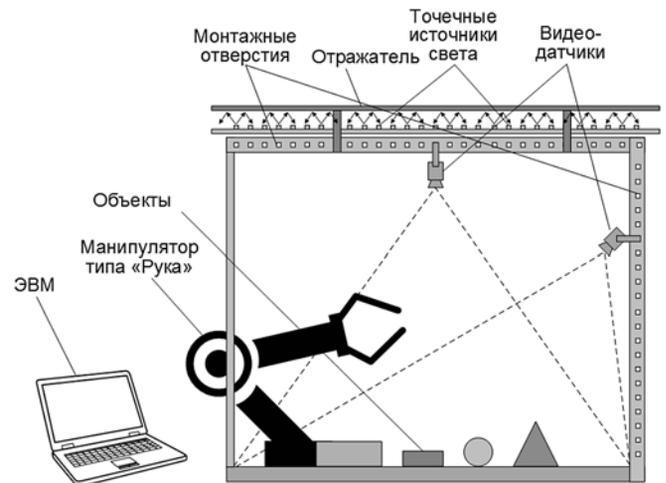


Рис. 5. Схема макета системы автоматического распознавания произвольно расположенных трехмерных объектов

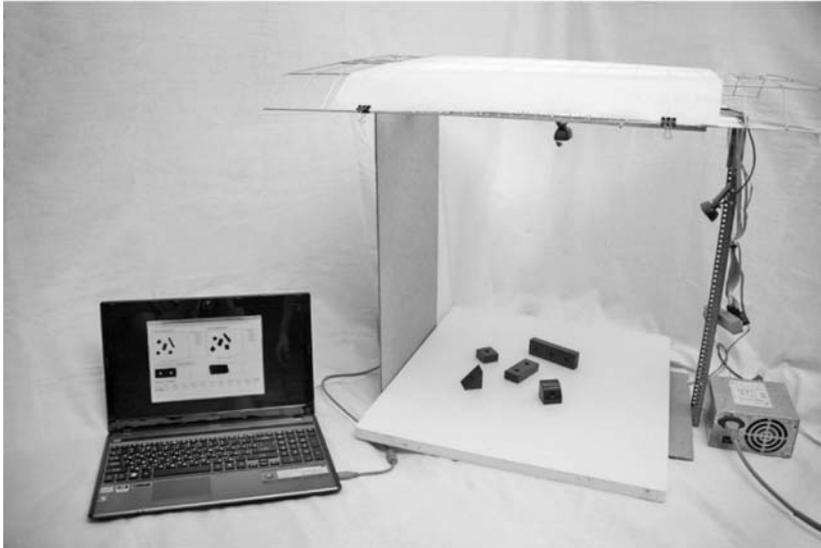


Рис. 6. Изображение макета CAP 3D

туру, объединяющую в себе крепежные элементы, видеодатчики, систему отраженного рассеянного освещения.

Макет для исследований состоит из следующих компонентов: каркасная рама; область сцены; подсистема освещения; отражатель (рассеиватель); источник питания для подсистемы освещения; видеодатчики; ПК с внешними устройствами.

Изображение разработанного макета системы автоматического распознавания трехмерных объектов (CAP 3D) представлено на рис. 6.

Каркасная рама представляет собой железную раму с отверстиями для крепления других блоков. Область сцены — матовое пластиковое полотно для размещения объектов. В качестве подсистемы бестеневого освещения используется рассредоточенный источник света на основе нескольких параллельных светодиодных лент, освещающих объект через отражатель.

В качестве алгоритма распознавания использовался алгоритм вычисления оценок (АВО), в качестве признаков — разработанные автором диагональные признаки формы невыпуклых изображений.

Сравнение значений признаков распознаваемой и эталонных проекций трехмерных объектов осуществляется алгоритмом вычисления оценок. Строится бинарная таблица АВО.

Суммарная оценка по всем признакам отвечает за степень сходства эталонной проекции к рассматриваемой, чем она больше, тем больше вероятность верного распознавания.

Процесс предварительной обработки снимков проекций реальных трехмерных объектов изображен на рис. 7 (МН, NH, EH, DH — диагональные отрезки ОП; FH, GH, F'H, G'H — диагональные отрезки объекта).

После поступления в систему пара входных полутоновых изображений ортогональных и косоугольных проекций распознаваемых объектов подвергается операциям предварительной обработки, маркировки и формирования очереди на распознавание.

Затем берется бинарное изображение проекции объекта из очереди на распознавание и нормализуется по повороту. После этого выделяется контур и вычисляются координаты двух наи-

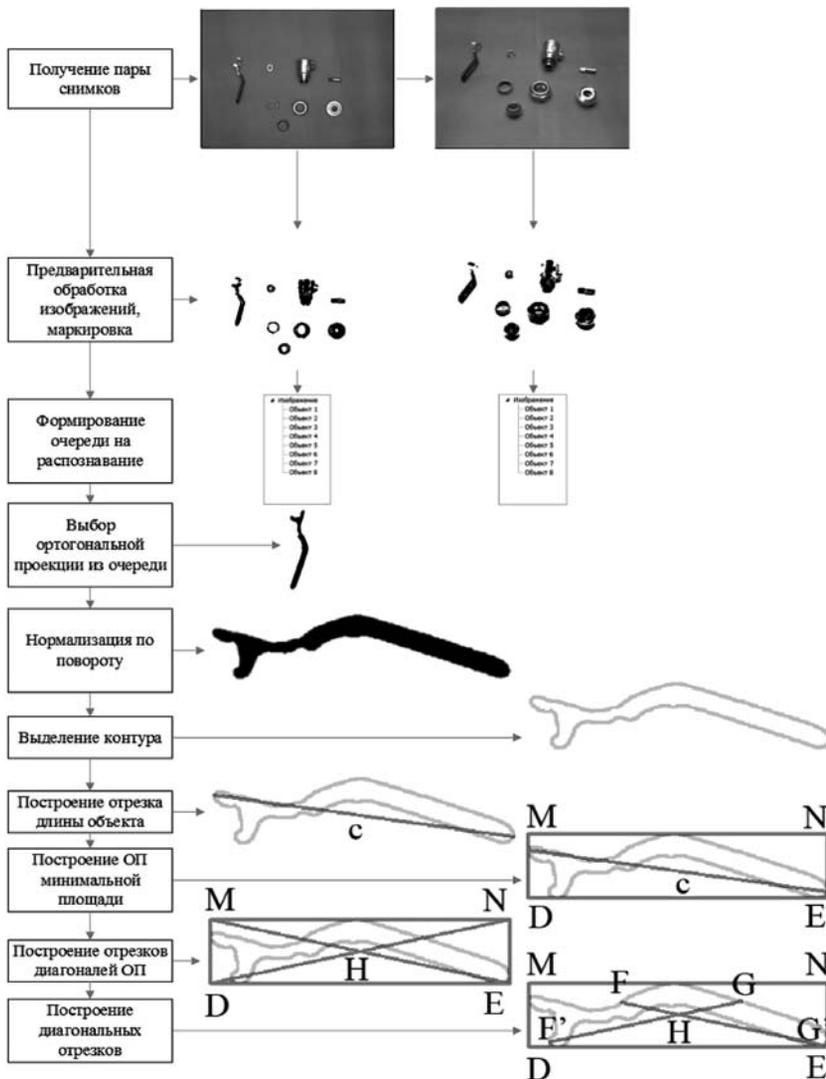


Рис. 7. Процесс предварительной обработки снимков проекций трехмерных объектов

более удаленных друг от друга точек контура и строится отрезок длины объекта. Далее строятся ОП (минимальной площади) вокруг контура проекции трехмерного объекта и его диагонали. Затем вычисляются признаки изображений. В соответствии с описанным выше алгоритмом выполняются классификация и распознавание проекций трехмерных объектов.

Далее вычисляются координаты точек пересечения контура и диагоналей ОП и строятся диагональные отрезки. Затем определяется класс каждого из объектов в очереди, вычисляются признаки диагональных отрезков и осуществляется распознавание.

Для ускорения вычислений в разработанной САР трехмерных объектов планируется использовать аппаратное обеспечение, основанное на мемристорах [12–14]. Мемристор — новый нанoeлектронный элемент, используемый для аппаратной реализации высокопроизводительных компьютерных средств.

### Заключение

В результате проведенных исследований была доказана применимость разработанной модели для распознавания произвольно расположенных трехмерных объектов даже в случаях, когда их проекции имеют невыпуклую форму.

### Список литературы

1. **Sensoren**. URL: <http://www.sensoren.ru> (дата обращения: 25.01.2017).
2. **Sick sensor intelligence**. URL: <http://www.sick-automation.com.ua/> (дата обращения: 25.01.2017).

3. **Sensotec**. URL: <http://sensotek.ru/> (дата обращения: 25.01.2017).

4. **Садьков С. С., Терехин А. В.** Классификация геометрических фигур, вписанных в квадрат, по их форме с использованием диагональных признаков // Прикаспийский журнал. Управление и высокие технологии. 2014. № 1. С. 81–91.

5. **Садьков С. С., Терехин А. В.** Алгоритм классификации выпуклых фигур с использованием диагональных признаков формы // Вестник КГУ им. Н. А. Некрасова. 2013. № 6. С. 13–17.

6. **Садьков С. С., Терехин А. В.** Система автоматического распознавания произвольно расположенных трехмерных объектов // Динамика сложных систем XXI век. 2015. — № 1. С. 3–6.

7. **Бубенников А. В.** Начертательная геометрия: учеб. для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1985. 288 с.

8. **Терехин А. В.** Распознавание трехмерных объектов по изображениям двух проекций // Информационные технологии. 2014. № 4. С. 43–48.

9. **Терехин А. В.** Распознавание объектов методом вычисления оценок с использованием диагональных признаков формы // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2014. № 1. С. 17–25.

10. **Terekhin A. V.** The Algorithm for Generating Pairs of Projections of Three-Dimensional Objects on Two Images // J. Applied Mechanics and Materials. 2015. N. 770. P. 604–607.

11. **Galushkin A. I., Danilin S. N., Shchanikov S. A.** The research of memristor-based neural network components operation accuracy in control and communication systems // Source of the Document 2015 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2015 — Proceedings. 2015. P. 1–6 (DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147034).

12. **Danilin S. N., Shchanikov S. A.** Neural Network Control Over Operation Accuracy of Memristor-based Hardware // Proceedings of 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems, MEACS 2015. 2015. P. 1–5.

13. **Danilin S. N., Shchanikov S. A., Panteleev S. V.** The Algorithm of Operation Accuracy Determining for Memristors-based Artificial Neural Network Synapse // CriMiCo 2015 — 2015 25th International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology, Conference Proceedings. 2015. P. 724–725.

14. **Danilin S. N., Shchanikov S. A., Panteleev S. V.** The design of educable components of infocommunication systems with specified operation accuracy // CriMiCo 2015 — 2015 25th International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology, Conference Proceedings. 2015. P. 305–306.

**A. V. Terekhin**, Assistant Professor, e-mail: [terehin\\_murom@mail.ru](mailto:terehin_murom@mail.ru), Murom Institute (branch) of Vladimir State University named after Alexander G. and Nicholas G. Stoletovs, Murom

## The Approach to the Classification of Projections of Three-Dimensional Objects

*Automation of production occurred in the 40–50 years of the last century. Active research and development in this area have been associated with the emergence of demand for assemblies and conveyor lines. Appearance of the first robotic systems marked a qualitatively new stage in the development of human-machine systems. This has contributed to the development of field of machine vision, performing object recognition functions, which are located in areas of the scene in front of the robot manipulator. The functioning of these systems requires the development of specialized software. The accuracy of identification of objects depends on the correct choice of the classification model. In addition, the development of automatic recognition systems urgent task is the right choice of criteria for the classification of the objects. In connection with the above, the development of a new model of classification of non-convex image plane is an urgent task. The research is aimed at solving the problem of classifying the three-dimensional object projection in the automatic recognition systems. This article describes the classification model of flat-convex images by their form. The criteria for classification in this model uses a combination of diagonal segments in the four quadrants of the bounding rectangle of image of the object.*

**Keywords:** automatic recognition system, three-dimensional object, classification model, identification, flat nonconvex image, diagonal form features, pattern recognition, image analysis, diagonal segment, tuples

## References

1. **Sensoren.** URL: <http://www.sensoren.ru> (data obrashcheniya: 25.01.2017).
2. **Sick** sensor intelligence. URL: <http://www.sick-automation.com.ua/> (data obrashcheniya: 25.01.2017).
3. **Sensotec.** URL: <http://sensotek.ru/> (data obrashcheniya: 25.01.2017).
4. **Sadykov S. S., Terehin A. V.** Klassifikacija geometricheskikh figur, vpisannykh v kvadrat, po ih forme s ispol'zovaniem diagonal'nykh priznakov [Classification of geometric shapes, inscribed in the square, according to their shape using diagonal form features], *Prikladnyy zhurnal. Upravlenie i vysokie tehnologii*, 2014, no. 1, pp. 81–91 (in Russian).
5. **Sadykov S. S., Terehin A. V.** Algoritm klassifikacii vypuklykh figur s ispol'zovaniem diagonal'nykh priznakov formy [Classification Algorithm of convex figures with diagonal form features], *Vestnik KGU im. N. A. Nekrasova*, 2013, no. 6, pp. 13–17 (in Russian).
6. **Sadykov S. S., Terehin A. V.** Sistema avtomaticheskogo raspoznavaniya proizvol'no raspolozhennykh trehmernykh ob'ektov [Automatic recognition system of randomly located three-dimensional objects], *Dinamika slozhnykh sistem XXI vek*, 2015, no. 1, pp. 3–6 (in Russian).
7. **Bubennikov A. V.** *Nachertatel'naya geometriya: ucheb. dlya vuzov.* 3-e izd., pererab. i dop., Moscow, Vyssh. shk., 1985, 288 p. (in Russian).
8. **Terehin A. V.** Raspoznavanie trehmernykh ob'ektov po izobrazhenijam dvuh proekcij [Recognition of three-dimensional objects by the images of the two projections], *Informacionnye tehnologii*, 2014, no. 4, pp. 43–48 (in Russian).
9. **Terehin A. V.** Raspoznavanie ob'ektov metodom vychislenija ocenok s ispol'zovaniem diagonal'nykh priznakov formy [Object recognition by computing estimates using a diagonal form features], *Izvestija vysshih uchebnykh zavedenij. Povolzhskij region. Tehnicheskie nauki*, 2014, no. 1, pp. 17–25 (in Russian).
10. **Terekhin A. V.** The Algorithm for Generating Pairs of Projections of Three-Dimensional Objects on Two Images, *J. Applied Mechanics and Materials*, 2015, no. 770, pp. 604–607.
11. **Galushkin A. I., Danilin S. N., Shchanikov S. A.** The research of memristor-based neural network components operation accuracy in control and communication systems, *Source of the Document 2015 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2015 – Proceedings. 2015*, pp. 1–6 (DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147034).
12. **Danilin S. N., Shchanikov S. A.** Neural Network Control Over Operation Accuracy of Memristor-based Hardware, *Proceedings of 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems, MEACS 2015*, 2015, pp. 1–5.
13. **Danilin S. N., Shchanikov S. A., Panteleev S. V.** The Algorithm of Operation Accuracy Determining for Memristors-based Artificial Neural Network Synapse, *CriMiCo 2015 – 2015 25th International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology, Conference Proceedings*, 2015, pp. 724–725.
14. **Danilin S. N., Shchanikov S. A., Panteleev, S. V.** The design of educable components of infocommunication systems with specified operation accuracy, *CriMiCo 2015 – 2015 25th International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology, Conference Proceedings*, 2015, pp. 305–306.



10—13 октября 2017 г.  
Москва, МГУ им. М. В. Ломоносова  
**XIX международная конференция  
АНАЛИТИКА И УПРАВЛЕНИЕ  
ДАНЫМИ В ОБЛАСТЯХ С ИНТЕНСИВНЫМ  
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ**  
(DAMDID/RCDL'2017)



### Тематика конференции

#### *Треки сферы анализа данных, решения задач, организации экспериментов в DID:*

- Особенности данных в DID
- Постановки и решение задач в DID
- Организация экспериментов в DID
- Гипотезы и модели (как составная часть исследовательских экспериментов в DID)
- Развитые методы и процедуры анализа данных в DID
- Концептуальное моделирование предметных областей в DID
- Применения анализа с интенсивным использованием данных в исследованиях в DID

#### *Треки сферы управления данными в DID:*

- Интеграция данных в DID
- Извлечение данных из текстов
- Исследовательские инфраструктуры данных и их применение в DID
- Роль Семантического Веба в DID

Подробную информацию о конференции см. на сайте:  
<http://damdid2017.frccsc.ru/>

# БЕЗОПАСНОСТЬ ИНФОРМАЦИИ CRYPTOSAFETY INFORMATION

УДК 621.391

**С. В. Дворников**, д-р техн. наук, проф., e-mail: practcdsv@yandex.ru,  
**А. В. Пшеничников**, канд. техн. наук, доц., e-mail: siracooz77@mail.ru,  
**С. С. Манаенко**, канд. техн. наук, e-mail: manaenkoss@mail.ru,  
**С. С. Дворников**, бакалавр, e-mail: practcdsv@yandex.ru,

Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С. М. Буденного, г. Санкт-Петербург

## Метод формирования многопозиционных помехозащищенных сигнальных конструкций

*Рассматривается метод формирования помехозащищенных сигнальных конструкций за счет представления сложных моделей сигналов совокупностью простейших модуляционных конструкций и их объединения с использованием методологии мультиплексирования с ортогональным частотным разделением каналов Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (OFDM). Практической значимостью разработанного метода является возможность относительно несложной его технической реализации, увеличения позиционности сигналов при условии минимального расширения базы и увеличения энергетического ресурса радиолинии.*

**Ключевые слова:** сигнально-кодовая конструкция, помехозащищенность, многопозиционные сигналы, квадратурная амплитудная модуляция, OFDM

### Введение

Вопросы обеспечения требуемой эффективности цифровых линий радиосвязи являются приоритетными на современном этапе развития объединенной автоматизированной цифровой сети связи. В частности, для выполнения задач, возлагаемых на сеть радиосвязи, необходимо решение двух актуальных задач: повышение помехозащищенности и пропускной способности образующих ее линий радиосвязи.

Анализ технических решений в области повышения помехозащищенности линий радиосвязи, представленных в работах [1—4], показывает, что в их основе, как правило, лежит принцип увеличения базы сигнала за счет использования различных технологий расширения полосы излучения радиосигнала.

Так, в работе [2] с учетом ограничений, накладываемых моделями каналов, предложено использование режима с программной (псевдослучайной) перестройкой рабочей частоты (ППРЧ). При этом разработанный алгоритм ППРЧ предполагает, что перестройка субчастот в пределах выделенного для ведения радиосвязи диапазона происходит в соответствии с кодом псевдослучайной последовательности (ПСП).

Таким образом, стратегия программной перестройки, обеспечивающая повышение помехозащищенности радиолиний, заключается в своевремен-

ном "уходе" радиосигнала от воздействия преднамеренных помех за счет кратковременности работы на каждой из субчастот. Следовательно, в линиях радиосвязи с ППРЧ важной характеристикой является фактическое время непрерывной работы на одной частоте.

В работе [3] обосновано в интересах повышения помехозащищенности использование прямого расширения спектра сигнала методом умножения информационной битовой последовательности на ПСП. Такое преобразование сигнала приводит к уменьшению спектральной плотности мощности сигнала в единичной полосе частот, что в конечном итоге определяет повышение помехозащищенности радиолиний. При технической реализации методов прямого расширения спектра необходимо учитывать, что они предъявляют большие требования к характеристикам канала по сравнению с режимами ППРЧ, однако при этом дополнительно обеспечивается структурная скрытность сигнала.

Среди подходов, получивших широкое распространение в последнее время, наибольший интерес представляет технология расширения спектра за счет применения вейвлет-функций при формировании фрагментов радиосигнала [4]. Представление радиосигнала в базисе вейвлет-функций, как и прямое расширение спектра, дополнительно увеличивает структурную скрытность сигнала, кото-

рая зависит от порядка формирующей функции Гаусса.

Вопросы повышения пропускной способности цифровых линий радиосвязи нашли отражение в работах [5–10]. В частности, в [5–7] приведены модели многопозиционных сигналов, трансформация констелляционных диаграмм которых способствовала повышению помехоустойчивости и пропускной способности линии радиосвязи. В [8–9] обоснованы теоретические принципы преобразования сигналов, обеспечивающие повышение их устойчивости к воздействию помех различной природы. В [10] обоснованы адаптивные методы решения задач помехозащиты линий радиосвязи.

### Модели многопозиционных сигнальных конструкций с повышенной помехозащищенностью

Анализ рассмотренных подходов показывает, что всех их объединяет применение сложных алгоритмов, базирующихся на использовании частотных ресурсов выделенных радиолиний. При этом основной целью управления радиолинией является повышение ее развед- и помехозащищенности за счет скрытности формируемых сигнальных конструкций, как правило, в частотном пространстве, при сохранении или частичном уменьшении информационной скорости передачи информации.

Между тем существенным негативным фактором проанализированных подходов является то, что их эффективное использование предполагает повышение требований к параметрам канала по их линейности, помехоустойчивости, дисперсионным задержкам, что неизбежно приводит к существенному усложнению трактов формирования и обработки сигналов на рабочих частотах. Поэтому применение сложных сигнально-кодовых конструкций

(СКК), особенно многопозиционных, в подобных системах радиосвязи связано со значительными техническими сложностями [11].

Кроме того, необходимо отметить сложность управления ресурсами таких радиолиний [12, 13]. Данный факт обуславливает возрастание времени цикла управления и в конечном итоге снижение устойчивости функционирования радиолинии, что приводит к уменьшению ее помехозащищенности.

С учетом выявленных противоречий целью данной работы является разработка модели помехозащищенного многопозиционного квадратурного сигнала, не требующей существенного структурного усложнения приемопередающих трактов формирования и обработки.

Для достижения поставленной цели наиболее целесообразно применение методов теорий сигналов и статистической радиотехники [14, 15], согласно которым сложные модели сигналов предлагается представить совокупностью простейших СКК с известной структурой. В свою очередь, для решения этой задачи, интересным видится использование принципов разбиения сложных сигналов на непересекающиеся подмножества, сформулированных Унгербоеком [2].

Так, согласно данному подходу, СКК КАМ-16 (квадратурная амплитудная манипуляция 16-позиционного сигнала) может быть представлена на основе четырех непересекающихся СКК QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) (рис. 1) или восьми СКК типа BPSK (Binary Phase Shift Keying).

В интересах дальнейшего исследования в качестве простейшего модуляционного формата, используемого при формировании СКК большей размерности, определим СКК типа QPSK. Выбор указанной сигнальной конструкции обусловлен обеспечиваемой им максимальной битовой скорости при наилучшей помехоустойчивости [1]. В равной степени возможно использование и СКК типа BPSK. Однако в этом случае для сохранения битовой скорости необходимо выделить больший частотный ресурс радиолинии, что не всегда реализуемо на практике.

В своих работах Унгербоек увязал кодирование сигнала совместно с его формированием. Авторы не претендуют на технологию кодирования и в дальнейшем предполагают, что указанная операция у сравниваемых конструкций реализуется аналогичным образом.

Поэтому в дальнейшем рассмотрим возможность использования данной технологии для передачи на ее основе многопозиционных сигналов.

Между тем перспективным подходом к повышению помехоустойчивости

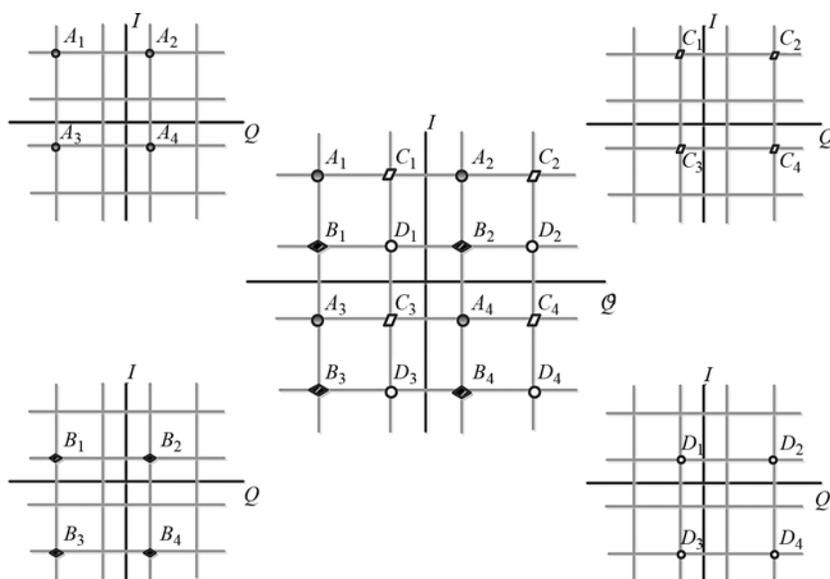


Рис. 1. Представление СКК КАМ-16 на основе четырех СКК типа QPSK

многомерных сигналов является применение технологии OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing — мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов). При этом авторы акцентируют внимание на том, что дальнейшее использование сформированных OFDM-конструкций не лежит в рамках исследования. В этом случае копии сигнальных конструкций, обрабатываемых на приемной стороне на каждой из поднесущих частот OFDM, будут независимыми [16].

Формирование многомерных помехозащищенных сигнальных конструкций представим на примере СКК КАМ-16, обобщив затем предлагаемый подход для СКК больших размерностей. Последовательность технологических операций определим следующими этапами:

- выбор простейшего модуляционного формата;
- определение числа простейших модуляционных конструкций;
- формирование OFDM-сигнала.

Указанную совокупность определим как метод формирования многопозиционных помехозащищенных сигнальных конструкций.

В частности, при представлении СКК КАМ-16 на основе четырех СКК типа QPSK (см. рис. 1) необходимо выделение четырех частот, параметры которых определяются форматом OFDM. Между тем анализ исходной битовой последовательности (ИБП), модулирующей СКК КАМ-16 (табл. 1), показывает, что для сокращения задействованного частотного ресурса достаточно использовать только две СКК типа QPSK, если передавать первую СКК QPSK, промодулированную первой парой элементов ИБП на первой частоте OFDM, а вторую — на второй.

При условиях независимости событий ошибочного приема элементов сигнала на частотах OFDM и статистической однородности частот вероятность символьной ошибки такой предлагаемой модели КАМ-16 может быть вычислена как вероятность полной группы событий по следующей формуле:

$$P_{\text{ошКАМ-16}} = P_{\text{ошQPSK}}(2 - P_{\text{ошQPSK}}). \quad (1)$$

Разработанный подход к формированию может быть применен к квадратурным СКК любой размерности. Действительно, при добавлении еще од-

ной СКК QPSK и частоты OFDM получим СКК КАМ-64. При этом

$$P_{\text{ошКАМ-64}} = P_{\text{ошQPSK}}(P_{\text{ошQPSK}}^2 - 3P_{\text{ошQPSK}} + 3). \quad (2)$$

Для КАМ-256 соответственно будем иметь

$$P_{\text{ошКАМ-256}} = P_{\text{ошQPSK}}(4P_{\text{ошQPSK}}^2 - 6P_{\text{ошQPSK}} - P_{\text{ошQPSK}}^3 + 4). \quad (3)$$

В целях сравнительной оценки помехоустойчивости разработанных сигнальных конструкций в системе Simulink проведено моделирование их формирования и приема в канале с аддитивным белым гауссовым шумом. Сравнивались модели, полученные на основе предлагаемого метода — СКК QPSK\*2, QPSK\*3, QPSK\*4, QPSK\*5 и известные ранее — СКК QPSK, КАМ-16, КАМ-64, КАМ-256, КАМ-1012. На рис. 2—4 получены зависимости вероятностей битовой ( $P_{\text{ош б}}$ ) и символьной ( $P_{\text{ош с}}$ ) ошибок приема от отношения энергии сигнала к энергии шума (ОСШ)  $h_0$ . При этом в расчете величины  $P_{\text{ош б}}$  для разработанных моделей СКК учтен характер распределения энергии для формирования сигнала между частотами OFDM.

В табл. 2 приведены значения отношения энергии бита к энергии шума для исследуемых моделей СКК QPSK, КАМ-16 (QPSK\*2), КАМ-64 (QPSK\*3), КАМ-256 (QPSK\*4), КАМ-1024 (QPSK\*5) при фиксированном значении вероятности битовой ошибки  $P_{\text{ош б}} = 10^{-5}$ .

Анализ результатов, полученных в ходе исследования, позволяет сделать следующие заключения.

1. Формирование СКК квадратурных сигналов прямым методом требует значительного увеличения энергетических ресурсов радиолинии при росте позиционности СКК по отношению к предлагаемому подходу. Действительно, вероятность битовой ошибки  $10^{-5}$  при формировании СКК КАМ-16 достигается при 13,5 дБ (см. рис. 2, рис. 3, табл. 2), КАМ-64 — 17,5 дБ, КАМ-256 — 22,5 дБ. Другими словами, при формировании СКК КАМ-16 требуется повысить энергетику радиолинии в 2,7 раза для сохранения достоверности передачи информации

Таблица 1

Исходная битовая последовательность для формирования СКК КАМ-16

1-я пара	2-я пара						
00	00	01	00	10	00	10	00
00	01	01	01	10	01	10	01
00	10	01	10	10	10	10	10
00	11	01	11	10	11	10	11

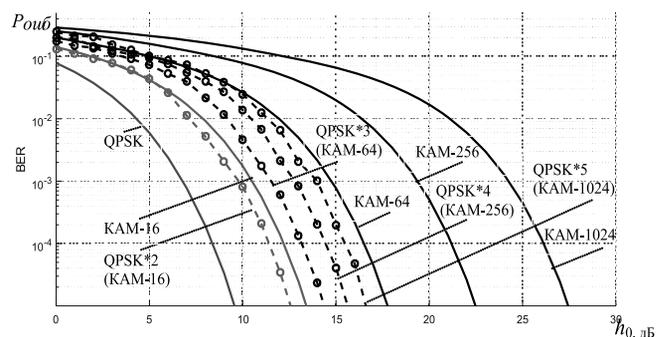


Рис. 2. Вероятность битовой ошибки приема многопозиционных СКК

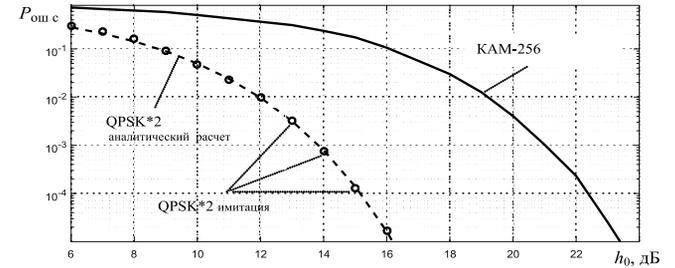
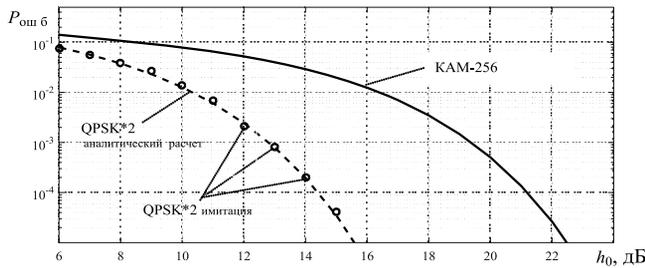
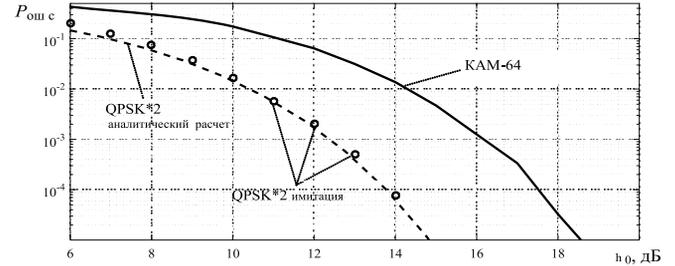
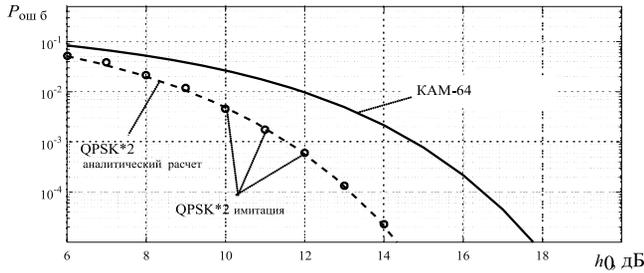
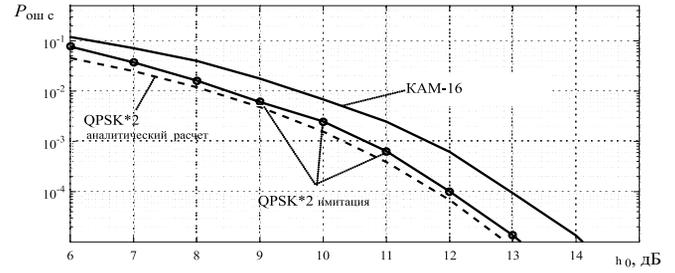
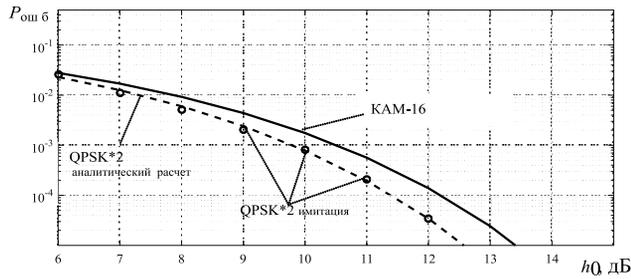


Рис. 3. Вероятность битовой ошибки приема помехозащищенных СКК

Рис. 4. Вероятность символьной ошибки приема помехозащищенных СКК

по отношению к формирующей СКК QPSK, СКК KAM-64 — в 6,2 раза, СКК KAM-256 — в 21 раз.

Следует отметить, что применение разработанного метода приводит к увеличению частотной базы формируемой СКК: для СКК KAM-16 в 2 раза, СКК KAM-64 в 3 раза, СКК KAM-256 — в 4 раза.

2. Увеличение позиционности  $M$  формируемой разработанным методом многомерной СКК в 4 раза предполагает повышение энергетики радиолинии на 1,5 дБ при условии фиксированного значения вероятности битовой ошибки  $10^{-5}$  (см. табл. 2). При этом с ростом значения  $M$  возрастает значение энергетического выигрыша при формировании СКК. Действительно, при условии  $P_{\text{ош б}} = 10^{-5}$  энергетический выигрыш при формировании СКК QPSK\*2 составляет 1,1 раза при расширении час-

тотной базы СКК в 2 раза по сравнению с СКК KAM-16, при формировании СКК QPSK\*3 — в 3,5 раза при расширении частотной базы в 3 раза, при формировании СКК KAM-1024 — в 11,5 раз при расширении частотной базы в 5 раз (см. табл. 2).

Таким образом, эффективность разработанного метода, рассчитанная по показателю отношения полученного энергетического выигрыша к увеличению частотной базы, составляет для СКК QPSK\*2 (KAM-16) — 0,55 дБ/Гц, для СКК QPSK\*3 (KAM-64) — 1,16 дБ/Гц, для СКК QPSK\*4 (KAM-256) — 1,88 дБ/Гц, для СКК QPSK\*5 (KAM-1024) — 2,3 дБ/Гц.

Необходимо отметить, что применение разработанного метода формирования многопозиционных сигналов предполагает решение задачи управления частотным и энергетическим ресурсами радиолинии в целях изменения скорости передачи информации. Действительно, одновременное увеличение частотного ресурса на единичное значение, а энергетического — на 1,5 дБ определяет увеличение позиционности формируемой СКК в 4 раза. Следовательно, разработанный метод задает минимальные требования к изменению частотного и энергетического ресурсов радиолинии, определяющих изменение скорости передачи информации.

Таблица 2

Значения  $h_0$  для многомерных СКК при фиксированном значении вероятности битовой ошибки  $P_{\text{ош б}} = 10^{-5}$

Позиционность $M$	4	16	64	256	1024
KAM, дБ	9,3	13,6	17,5	22,5	27,5
QPSK*n, дБ; n = 2, 3, 4, 5	—	12,5	14	15,5	17
$\Delta h_0$ , дБ	—	1,1	3,5	7,5	11,5

3. Уменьшение позиционности  $M$  многомерных СКК до позиционности формирующей СКК QPSK в разработанном методе ведет к увеличению длительности передаваемого бита в  $k_{\text{мск}}/2$  раз, где  $k_{\text{мск}}$  — последовательность одновременно передаваемых битов в известной  $M$ -позиционной сигнальной конструкции. При этом значение энергии бита ( $E_b$ ) остается неизменным, так как увеличение длительности бита при использовании СКК QPSK компенсируется равным делением энергетических ресурсов на частотные составляющие OFDM.

Например, при формировании 16-позиционной СКК разработанным методом увеличение длительности символа в 2 раза по сравнению с СКК КАМ-16 компенсируется делением энергии на две частотные ортогональные составляющие, при формировании 64-позиционной СКК — увеличение длительности в 3 раза компенсируется делением энергии на три составляющие и т. д.

Однако увеличение длительности бита в разработанной модели СКК приводит к уменьшению полосы частот, в пределах которой передается основная часть энергии сигнала, по сравнению с известными моделями. Данный факт определяет уменьшение энергии шума, а следовательно, получаемый выигрыш по помехоустойчивости разработанной сигнальной конструкции.

4. Предлагаемый метод позволяет более рационально использовать частотный ресурс радиолинии, чем подход к представлению многопозиционных сигналов по Унгербоэку. Так, при формировании СКК КАМ-16 задействовано только две СКК QPSK и две частоты OFDM вместо традиционно используемых четырех СКК QPSK, что обуславливает получение выигрыша в 2 раза. При формировании КАМ-64 — три частоты, вместо восьми (деление на две СКК КАМ-16), получаем выигрыш, равный 2,67 раза. А при формировании КАМ-256 указанный выигрыш достигает порядка 8.

Поскольку применение предлагаемого метода подразумевает одновременную обработку нескольких частотных каналов, что повышает структурную сложность комплексов радиосвязи, то для его реализации целесообразно применение SDR (Software-Defined Radio) технологий [17]. При этом могут использоваться методы обработки многопозиционных сигналов с большой позиционностью при фактическом приеме СКК QPSK.

Предлагаемый метод формирования многопозиционных сигналов предполагает увеличение базы сигнала при улучшении достоверности передачи информации, что обеспечивает повышение помехозащищенности радиолинии. Кроме того, использование одного модуляционного формата в виде СКК QPSK ведет к повышению скрытности формируемой сигнальной конструкции. Отличительной особенностью предлагаемого метода является рациональное использование частотного ресурса

радиолинии, что позволяет либо повысить информационную скорость передачи информации, либо увеличить глубину кодирования [1].

5. Метод формирования многопозиционных сигналов с использованием СКК QPSK обладает большими потенциальными возможностями. Так, дальнейшее повышение эффективности его применения может быть основано на разработке технологий управления частотным ресурсом радиолинии в зависимости от условий сигнальной и помеховой обстановки, в развитие подходов, предложенных в работе [13].

Для оценки адекватности полученных решений проведены аналитические расчеты полученных имитационным моделированием значений вероятностей символьной и битовой ошибки СКК. Расчеты имитационного моделирования с достаточной точностью совпадают с аналитическими расчетами, что свидетельствует об адекватности модели. Корректность применения аналитического аппарата подтверждают полученные результаты.

Следует отметить, что предлагаемый метод не претендует на новизну технического решения, объединяющего технологию OFDM и применение СКК QPSK. Похожее решение реализовано, например, в стандарте 4G LTE для увеличения информационной скорости передачи информации. Однако разработанный метод в отличие от указанного подхода позволяет формировать многопозиционные СКК с минимально необходимым расширением базы при незначительном ухудшении помехоустойчивости результирующей конструкции. Данное обстоятельство определяет возможность применения таких СКК в помехозащищенных радиолиниях, функционирующих в сложных условиях сигнальной и помеховой обстановки, при которых технология на основе прямого способа их формирования практически не реализуема.

#### **Предложения по повышению спектральной эффективности разработанных сигнальных конструкций**

Необходимо отметить, что полученные результаты не учитывают скачкообразного изменения мгновенной фазы при формировании СКК QPSK и OFDM, что на практике приводит к увеличению полосы излучения, а также к росту пик-фактора формируемой СКК, обуславливающих качественное снижение полученных результатов. Вместе с тем в работе [18] приведена структурно-функциональная модель СКК QPSK с повышенной помехоустойчивостью, свободная от указанных недостатков.

Для уменьшения негативного влияния скачкообразного изменения фазы при формировании многопозиционных СКК предлагаемым методом целесообразно использование предложенных в [18] технических решений. В их основе лежит принцип трансформации сигнального созвездия СКК QPSK в четырехпозиционный сигнал с гексагональной

структурой (ГЕКС), что определяет дополнительное повышение помехоустойчивости формируемой СКК, а также обеспечивает плавный набег фазы на длительности информационного символа, что компенсирует недостатки способа прямого формирования СКК QPSK.

Для иллюстрации предлагаемых решений на рис. 5 приведены эскизы временных диаграмм, поясняющие этапы формирования СКК QPSK\*2 в соответствии с разработанным методом. Представленные временные диаграммы получены на основе моделирования в системе MATLAB. Временные диаграммы на рис. 5, а—ж раскрывают метод формирования СК ГЕКС в соответствии с методикой, приведенной в работе [18]. При этом использована следующая система обозначений: СС ГЕКС 1 — синфазная составляющая СКК ГЕКС 1, КС ГЕКС 1 — квадратурная составляющая СКК ГЕКС 1, СС БМ ГЕКС 1 — синфазная составляющая с балансной модуляцией СКК ГЕКС 1, КС БМ ГЕКС 1 — квадратурная составляющая с балансной модуляцией СКК ГЕКС 1.

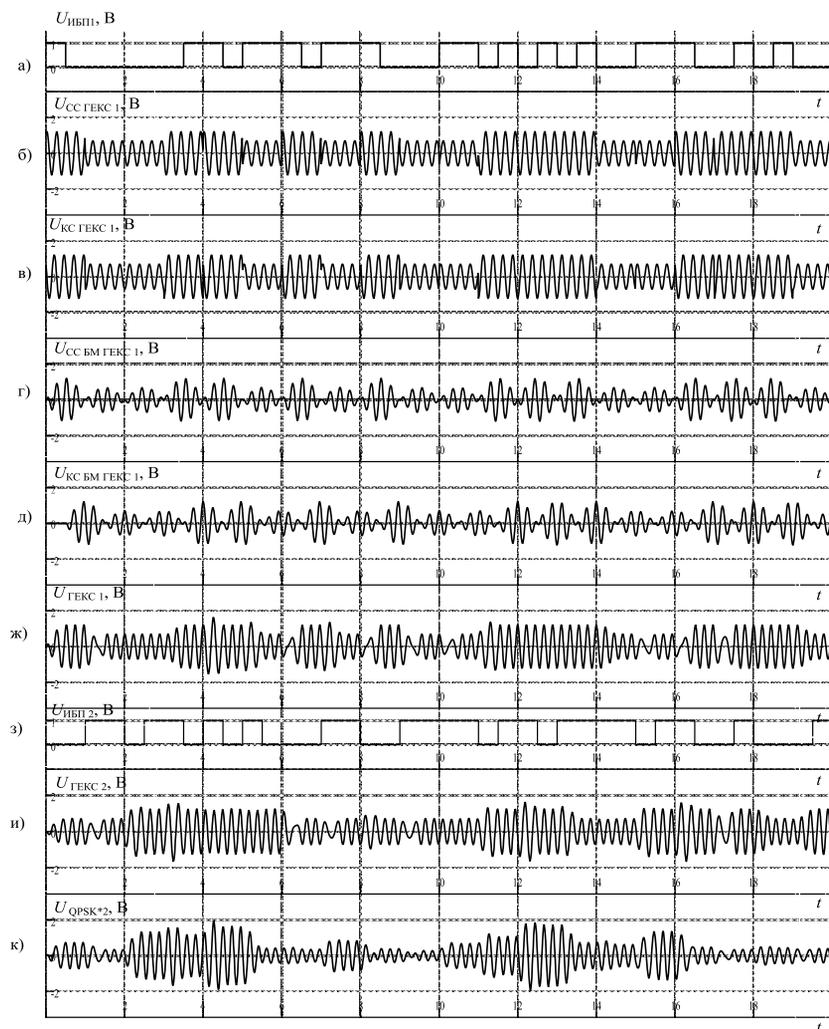


Рис. 5. Временное представление многопозиционных сигналов

На рис. 5, з, и приведены модулирующая ИБП и СКК ГЕКС 2. Многопозиционная СКК QPSK\*2, сформированная на двух ортогональных частотах, представлена на рис. 5, к. Для наглядности представления значения номиналов частот сформированных сигналов и времени на осях абсцисс являются условными.

Полученные результаты позволяют предположить, что применение разработанных в [18] технических решений совместно с рассматриваемым методом способствует плавному изменению амплитуд и фаз формируемых многомерных СКК. Данное обстоятельство, в свою очередь, позволяет сформулировать гипотезу об уменьшении значения полосы частот, в пределах которой сосредоточена основная часть энергии многопозиционной СКК, формируемой разработанным методом по сравнению с известными. Для ее подтверждения в среде Simulink проведено имитационное моделирование формирования многопозиционных СКК различными методами. Результаты эксперимента представлены на рис. 6.

При моделировании сетки частот OFDM полагалось, что  $f_{1\text{OFDM}} = 2$  МГц,  $f_{2\text{OFDM}} = 2,002$  МГц и  $f_{3\text{OFDM}} = 2,004$  МГц.

Из анализа полученных результатов наглядно видно, что при формировании сигналов разработанным методом ширина спектра формируемой СКК меньше, чем при формировании известными способами, что подтверждает гипотезу о спектральной эффективности разработанного метода формирования многопозиционных СКК и определяет получение выигрыша по помехоустойчивости формируемого сигнала. Кроме того, огибающая спектра сигналов, формируемых разработанным методом СКК, не имеет характерных признаков квадратурных сигналов, а при увеличении позиционности изменяется незначительно. Данный факт обуславливает спектральную скрытность формируемой СКК по сравнению с известными сигналами, что наряду с увеличением помехоустойчивости обеспечивает помехозащищенность формируемой многопозиционной СКК.

### Заключение

Таким образом, разработанная модель помехозащищенного многопозиционного сигнала значительно расширяет область применения многомерных СКК в радиолиниях при различном воздействии на их ресурсы.

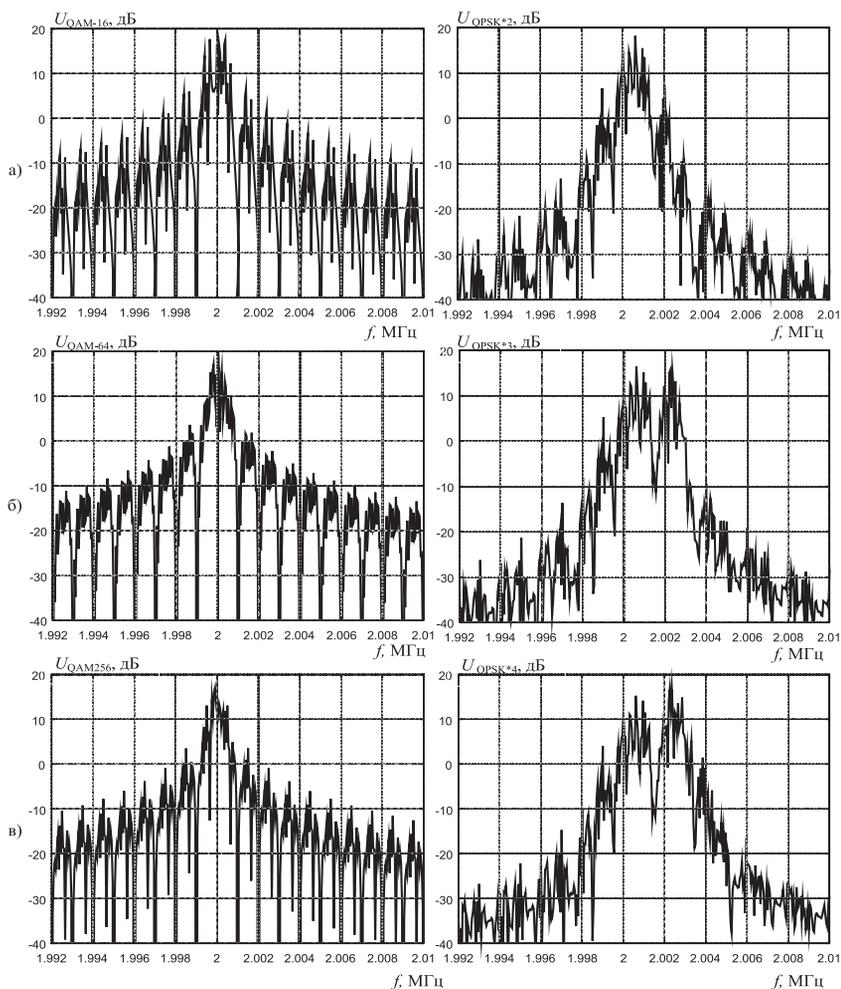


Рис. 6. Спектральное представление многопозиционных сигналов

При этом разработанные модели помехозащищенных сигнальных конструкций, в отличие от известных, не предъявляют высоких требований к алгоритмам их технической реализации, а также к параметрам каналов радиосвязи.

Разработанный метод формирования многомерных СКК за счет управления частотно-энергетическим ресурсом цифровых линий радиосвязи обеспечивает выигрыш по помехоустойчивости и скрытности формируемого сигнала. При отсутствии преднамеренного воздействия применение предлагаемых СКК способствует повышению скорости передачи информации.

Недостатки разработанного метода авторы видят в расширении базы сигнала, а также в возможности увеличения значения пик-фактора формируемой СКК [16]. В связи с этим направление дальнейших исследований связано с разработкой методов формирования сигнала OFDM, снижающим пик-фактор формируемой СКК, а также с разработкой алгоритмов управления ресурсами таких радиолиний.

## Список литературы

1. Proakis J. Digital communications. 5th. McGraw-Hill, 2008.
2. Ungerboeck G. Trellis-coded modulation with redundant signal sets Part I // IEEE, 1987. Vol. 25. P. 5–11.
3. Борисов В. И., Зинчук В. М., Лимарев А. Е. и др. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигнала методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты / Под ред. В. И. Борисова. М.: Радио и связь, 2000. 384 с.
4. Борисов В. И., Зинчук В. М., Лимарев А. Е. и др. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов модуляцией несущей псевдослучайной последовательностью / Под ред. В. И. Борисова. М.: Радио и связь, 2003. 640 с.
5. Дворников С. В., Манаенко С. С., Дворников С. С., Погорелов А. А. Синтез фазоманипулированных вейвлет-сигналов // Информационные технологии. 2015. Т. 21, № 2. С. 140–143.
6. Дворников С. С., Дворников С. В. Формирование сигналов с непрерывной фазой для передачи дискретной информации // Информационные технологии. 2016. Т. 22, № 6. С. 435–440.
7. Дворников С. В., Пшеничников А. В., Русин А. А., Дворников А. С. Повышение помехоустойчивости сигналов КАМ-16 с трансформированными созвездиями // Вопросы радиоэлектроники. Сер.: "Техника телевидения". 2014. № 2. С. 51–56.
8. Дворников С. В., Пшеничников А. В., Бурьякин Д. А. Структурно-функциональная модель сигнального созвездия с повышенной помехоустойчивостью // Информация и космос. 2015. № 2. С. 4–7.
9. Дворников С. В., Пшеничников А. В., Манаенко С. С. Помехоустойчивая модель сигнала КАМ-16 с трансформированным созвездием // Информационные технологии. 2015. Т. 21. № 9. С. 685–689.
10. Гужва А. Ю., Дворников С. В., Русин А. А., Пшеничников А. В. Методика трансформации сигнального созвездия КАМ-16 с изменением его формы // Электросвязь. 2015. № 2. С. 28–31.
11. Дворников С. В., Пшеничников А. В., Манаенко С. С., Бурьякин Д. А., Кузнецов Д. А. Теоретические положения повышения помехоустойчивости сигнально-кодовых конструкций квадратурных сигналов // Информация и космос. 2015. № 3. С. 13–16.
12. Военные системы радиосвязи. Часть I / Под ред. В. В. Игнатова. Л.: ВАС, 1989. 386 с.
13. Килимник Ю. П., Лебединский Е. В., Прохоров В. К., Шаров А. Н. Адаптивные автоматизированные системы военной радиосвязи / Под ред. А. Н. Шарова. Л.: ВАС, 1978. 284 с.
14. Величкин А. И. Теория дискретной передачи непрерывных сообщений. М.: Сов. радио, 1970. 296 с.
15. Franks L. E. Signal theory. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall, 1969. 60 p.
16. Волков Л. Н., Немировский М. С., Шинаков Ю. С. Системы цифровой радиосвязи: базовые методы и характеристики: Учеб. пособие. М.: Эко-Трендз, 2005. 392 с.
17. Макаров С. Б., Рашич А. В. Метод формирования спектрально-эффективных OFDM-сигналов на основе неортогональных базисных функций // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2009. Т. 2, № 76. С. 94–98.
18. Дворников С. В., Манаенко С. С., Пшеничников А. В. Спектрально-эффективные сигналы с непрерывной фазой // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2016. Т. 12, № 2. С. 87–93.

S. V. Dvornikov, Professor, e-mail: practicsdv@yandex.ru,  
A. V. Pshenichnikov, Assistant Professor, e-mail: siracooz77@mail.ru,  
S. S. Manaenko, Assistant Professor, e-mail: manaenkoss@mail.ru,  
S. S. Dvornikov, Student, e-mail: practicsdv@yandex.ru  
Military Communications Academy, St. Petersburg

## A Method of Forming Multiposition Jamproof Signal Constructions

The problem of providing the required efficiency of a digital telecommunication lines was and remains very important at all stages of development of the unified automated digital network connection. To perform the tasks assigned to the radio net, you need the solution to two pressing issues related to the enhancement of its noise immunity and bandwidth. One possible solution is based on the method of forming jamming signal constructions presented in this article. A distinctive feature of the developed method is the rational use of energy and frequency resources of the radio system. In the synthesis model is noise-free signal used elements of the General theory of communication and statistical radio engineering. The essence of the developed approach consists in the representation of the complex signal models a set of simple modulation structures with the known structure. The basis of the developed technology of synthesis of the proposed signal structures proposed, the principle of split complex signals Ungerboeck. In order to combine the modulating signal designs with increased immunity to interference is proposed to use the methodology of multiplexing with orthogonal frequency-division multiplexing Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (OFDM). Designed this way the signal design has the properties of orthogonality and has increased compared to the known value of noise immunity. Further enhancement of the effectiveness of the model is noise-free signal design, the authors associated with the localization of its spectral characteristics. For this we used the signal design of a hexagonal structure with additional balanced modulation forming their in-phase and quadrature components. The practical significance of the developed method of formation of the jamming signals is a relatively simple technical implementation, increasing their point mode subject to a minimum expanding the base and increasing the energy of the radio resource. Furthermore, the proposed signal-code construction in contrast to the known, has a high structural secrecy. This property is preserved by increasing its point mode. Proposals can be implemented in modern systems of radio communication operating in a conflict situation in terms of destructive impacts, and applied in the interests of further development of the elements of the theory of constructing a noise-immune radio system with a high information rate.

**Keywords:** signal-code construction, noise immunity, multiple signals, quadrature amplitude modulation, OFDM

### References

1. Proakis J. *Digital communications*. 5th. McGraw-Hill, 2008.
2. Ungerboeck G. Trellis-coded modulation with redundant signal sets Part II, *IEEE*, 1987, vol. 25, pp. 5–11.
3. Borisov V. I., Zinchuk V. M., Limarev A. E. i dr. *Pomehozashhishhennost' sistem radiosvjazi s rasshireniem spektra signala metodom psevdosluchajnoj perestrojki rabochej chastoty* (Noise immunity of radio communication systems with expansion of the signal spectrum by the method of pseudo-random adjustment of working frequency). Pod red. V. I. Borisova. Moscow, Radio i svjaz', 2000. 384 p. (in Russian).
4. Borisov V. I., Zinchuk V. M., Limarev A. E. i dr. *Pomehozashhishhennost' sistem radiosvjazi s rasshireniem spektra signalov moduljacij nesushhej psevdosluchajnoj posledovatel'nost'ju* (Noise immunity of radio communication systems with expansion of the range of signals modulated carrier pseudorandom sequence). Pod red. V. I. Borisova. Moscow, Radio i svjaz', 2003. 640 p. (in Russian).
5. Dvornikov S. V., Manaenko S. S., Dvornikov S. S., Pogorelov A. A. Sintez fazomani pulirovannyh vejvlet-signalov (Synthesis of phase-shift wavelet signals), *Informacionnye tehnologii*, 2015, vol. 21, no. 2, pp. 140–143 (in Russian).
6. Dvornikov S. S., Dvornikov S. V. Formirovanie signalov s nepreryvnoj fazoj dlja peredachi diskretnoj informacii (Formation of signals with a continuous phase for the transmission of discrete information), *Informacionnye tehnologii*, 2016, vol. 22, no. 6, pp. 435–440 (in Russian).
7. Dvornikov S. V., Pshenichnikov A. V., Rusin A. A., Dvornikov A. S. Povyshenie pomehoustojchivosti signalov QAM-16 s transformirovannymi sozvezdijami (Improving the noise immunity of the signals QAM-16 with a transformed constellation), *Voprosy radiojelektro-niki. Serija: Tehnika televidenija*. 2014. no. 2, pp. 51–56 (in Russian).
8. Dvornikov S. V., Pshenichnikov A. V., Burykin D. A. Strukturno-funkcional'naja model' signal'nogo sozvezdija s povyshennoj pomehoustojchivost'ju (Structural-functional model of the constellation with increased noise immunity), *Informacija i kosmos*. 2015. no. 2, pp. 4–7. (in Russian).
9. Dvornikov S. V., Pshenichnikov A. V., Manaenko S. S. Pomehoustojchivaja model' signala QAM-16 s transformirovannym sozvezdijem (Interference-signal model QAM-16 with a transformed constellation), *Informacionnye tehnologii*, 2015, vol. 21, no. 9, pp. 685–689 (in Russian).
10. Guzhva A. Ju., Dvornikov S. V., Rusin A. A., Pshenichnikov A. V. Metodika transformacii signal'nogo sozvezdija KAM-16 s izmenenie ego formy (Methods of conversion of constellation QAM-16 with a change of its shape), *Jelektrosvjaz'*. 2015. no. 2, pp. 28–31 (in Russian).
11. Dvornikov S. V., Pshenichnikov A. V., Manaenko S. S., Burykin D. A., Kuznecov D. A. Teoreticheskie polozhenija povyshenija pomehoustojchivosti signal'no-kodovyh konstrukcij kvadraturnyh signalov (Theoretical principles of noise immunity improvement of signal-code constructions of the quadrature signals), *Informacija i kosmos*, 2015, no. 3, pp. 13–16. (in Russian).
12. *Voennye sistemy radiosvjazi*. (Military radio system) Chast' I / Pod red. V. V. Ignatova. Leningrad, VAS, 1989. 386 p. (in Russian).
13. *Adaptivnye avtomatizirovannye sistemy voennoj radiosvjazi* (Adaptive automated system of military radio) / Ju. P. Kilimnik, E. V. Lebedinskij, V. K. Prohorov, A. N. Sharov. Pod red. A. N. Sharova. Leningrad, VAS, 1978. 284 p. (in Russian).
14. *Velichkin A. I. Teorija diskretnoj peredachi nepreryvnyh soobshhenij*. (The theory of discrete transmission of continuous messages). Moscow, Sov. radio, 1970. 296 p. (in Russian).
15. *Franks L. E. Signal theory*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall, 1969. 60 p.
16. Volkov L. N., Nemirovskij M. S., Shinakov Ju. S. *Sistemy cifrovoj radiosvjazi: bazovye metody i harakteristiki* (System digital radio: basic methods and characteristics): Ucheb. posobie. Moscow, Jeko-Trendz, 2005. 392 p. (in Russian).
17. Makarov S. B., Rashich A. V. Metod formirovanija spektral'no-jeffektivnyh OFDM-signalov na osnove neortogonal'nyh bazisnyh funkcij (The method of formation of spectral-efficient OFDM-signals on the basis of non-orthogonal basis functions), *Nauchno-tehnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politehnicheskogo universiteta*, 2009, vol. 2, no. 76, pp. 94–98 (in Russian).
18. Dvornikov S. V., Manaenko S. S., Pshenichnikov A. V. Spektral'no-jeffektivnye signaly s nepreryvnoj fazoj (Spectral-effective signals with continuous phase), *Vestnik voronezhskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta*, 2016, vol. 12, no. 2, pp. 87–93 (in Russian).

# ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ GEOINFORMATION SYSTEMS

УДК 004.78:631.674.5

**Е. Э. Головинов**, вед. науч. сотр., e-mail: evgeny@golovinov.info,

**Д. А. Аминев**, ст. науч. сотр., e-mail: evgeny@golovinov.info,

Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации им. А. Н. Костякова,

**И. И. Романова**, ст. преп., e-mail: a.romanov@hse.ru,

Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики"

## Алгоритм формирования, передачи и обработки мониторинговой информации от дождевальная машины на основе геоинформационных систем

*Исследуется проблема сбора данных телеметрии от узлов дождевальной машины и их передачи на удаленный терминал по различным телекоммуникационным каналам. Приведен перечень основных параметров, регистрируемых от дождевальной машины. Представлены детализированная схема потоков данных и блок-схема алгоритма обработки, преобразования и регистрации мониторинговой информации. Раскрыты методы преобразования данных в тракте телеметрии. Рассмотрены основные стандартизованные технологии передачи данных, используемые в тракте. Проведена оценка сложности реализации тракта.*

**Ключевые слова:** телеметрия, дождевальная машина, тракт передачи информации, система телекоммуникаций

### Введение

В последние годы, в связи с бурным развитием сельского хозяйства России, возникает необходимость модернизации существующих оросительных систем, что достигается развитием комплексных систем организации орошения, обеспечивающих рациональное распределение оросительной воды по полям и культурам. Задачи систем управления орошением выполняются путем согласования сроков и объемов подачи воды с работой дождевальной техники (ДТ) [1–3].

Существующее измерительное оборудование позволяет определять по отдельности некоторые характеристики работы ДТ, например, возможен следующий состав устанавливаемого на ДТ контрольно-измерительного оборудования:

- измеритель расхода воды;
- манометр для определения напора;
- спутниковые приемники (на основе ГЛОНАСС или других систем) для определения координат текущего положения, пройденного пути, траектории и скорости движения ДТ.

Использование механических средств контроля может приводить к дополнительным затратам. Так, например, если для определения расхода воды ДТ установить на каждую машину механический расходомер, это повысит гидравлические потери, что

приведет к увеличению расхода электроэнергии на насосной станции [4, 5]. Существует и другая альтернатива — предложенный в работах [6, 7] принцип расчета позволяет, основываясь на показаниях манометра и приемника ГЛОНАСС, определять ключевые гидравлические параметры производства поливных работ ДТ, что дает возможность отказаться от применения механических расходомеров за счет использования компьютеризированных систем.

### Преимущества компьютеризированных систем управления сельскохозяйственной техникой

В настоящее время все больше сельскохозяйственных производств применяют в своей работе компьютеризированные системы управления сельскохозяйственной техникой, которые позволяют выполнять следующие операции.

1. Определять географическое местоположение, направление и скорость движения сельскохозяйственной техники.

2. Осуществлять контроль погрузки, транспортировки, разгрузки сельскохозяйственных грузов.

3. Осуществлять контроль расхода топлива, а также несанкционированные сливы горючесмазочных материалов.

4. Проводить учет обработанных сельскохозяйственной техникой земельных угодий.

5. Контролировать время начала и окончания выполнения сельскохозяйственных работ.

6. Контролировать соблюдение скоростного режима при выполнении сельскохозяйственных работ.

7. Контролировать нахождение объекта в пределах обозначенного участка (поля) с контролем времени входа/выхода объекта.

8. Контролировать соблюдение маршрута, фиксировать факты его нарушения и необоснованных остановок.

9. Контролировать расход топлива на соответствие пройденному пути.

10. Выполнять автоматический экспорт данных в бухгалтерские системы, а также осуществлять расчет маршрутов.

11. Выполнять наложение трека движения техники на фото- и космоснимки территорий.

Согласно работе [4] применение современных систем контроля обеспечивает:

— сокращение затрат на содержание и эксплуатацию парка спецтехники и автомобилей на 20—25 %;

— сокращение времени простоя автопарка на 10—15 %;

— контроль и пресечение нецелевого использования спецтехники, обработки незаявленных полевых площадей;

— достижение экономии при проведении агрохимических мероприятий, в частности, сокращение внесения минеральных удобрений до 5 %.

Для эффективного использования компьютеризированных систем управления сельскохозяйственной техникой требуется организация качественной связи локальных узлов управления с удаленными терминалами.

## Тракт передачи данных телеметрии

Тракт передачи телеметрической информации от дождевальной машины на удаленный терминал представлен на рис. 1. Условно в тракте передачи можно выделить три основных элемента:

1) электронная аппаратура и телекоммуникационное оборудование дождевальной машины;

2) каналы связи для передачи телеметрической информации;

3) терминальное оборудование.

Тип выбранного канала связи определяет состав каналообразующей аппаратуры дождевальной машины и удаленного терминала.

Данные от датчиков  $D_1, \dots, D_N$  [11] различных параметров и различных скоростей поступают по разным, преимущественно проводным, интерфейсам (UART, I2C, SPI, 1-Wire, CAN, Blue Tooth дальностью до 10 м, USB, NMEA) на микроконтроллер, который мультиплексирует все данные в единый телеметрический поток и отправляет их на трансиверы. Трансиверы беспроводных каналов связи осуществляют формирование радиосигналов на определенных частотах посредством модуляции и фильтрации и через антенны излучают их в эфир.

В зависимости от типа канала связи и удаленности терминала предлагаются следующие варианты передачи телеметрии в удаленный терминал:

- по беспроводному интерфейсу Wi-Fi;
- по радиоканалу открытых частот 433 или 868 МГц [8];
- по каналу сотовой связи GSM, GPRS, HSPA, LTE через сеть Интернет;
- по спутниковому радиоканалу.

При использовании канала Wi-Fi (дальность до 100 м) терминал работает в режиме Host, создавая

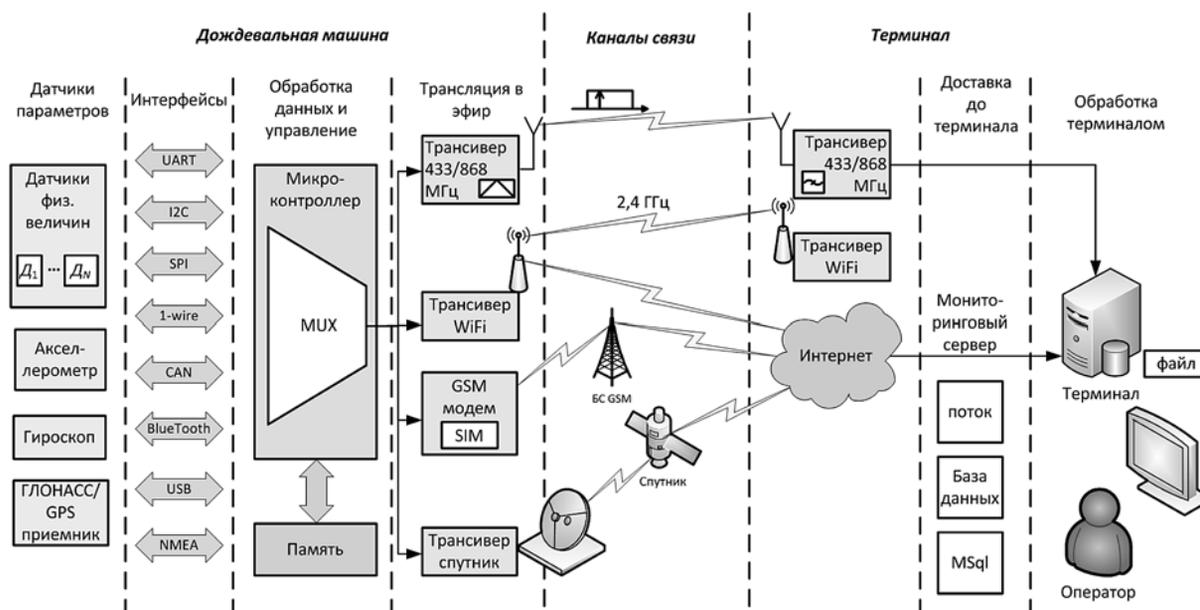


Рис. 1. Схема тракта передачи данных телеметрии ДМ на удаленный терминал

точку доступа, и по необходимости может принять поток телеметрии из аппаратуры дождевальной машины. Также не исключается вариант использования Wi-Fi для доступа в сеть Интернет.

При использовании радиоканала на частотах 433 или 868 МГц (дальность до 1 км) терминал должен быть оснащен специальным электронным модулем радиоканала и распаковки с драйвером трансивера, поскольку данные будут передаваться по специальному протоколу [13].

При передаче по каналу сотовой связи необходимо устанавливать карту SIM. Дождевальная машина должна находиться в зоне покрытия сотовой связи, вблизи базовых станций. Передача данных происходит через базовые станции сотовой связи в сеть Интернет на сервер, например MSQ-сервис.

Спутниковый радиоканал теоретически возможен, но в ближайшей перспективе является весьма дорогостоящим, в связи с чем в данном исследовании не рассматривается.

### Алгоритм обработки мониторинговой информации

В соответствии с трактом передачи телеметрической информации предлагается алгоритм ее преобразования, обработки и регистрации. На рис. 2 представлена блок-схема алгоритма.

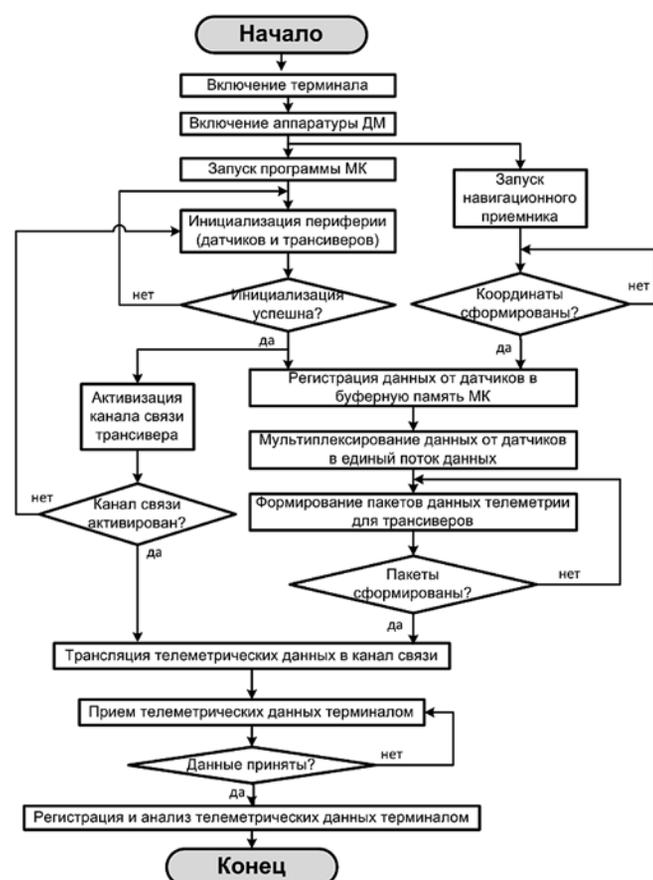


Рис. 2. Алгоритм формирования, передачи и обработки мониторинговой информации

При включении аппаратуры дождевальной машины (при запуске двигателя) начинается запуск программы микроконтроллера и инициализация подключенной к нему периферии — датчиков и трансиверов. Затем, в зависимости от используемого типа канала связи, начинается обмен пакетами (установка связи) с удаленным терминалом, точкой доступа Wi-Fi, базовой станцией сотовой связи или спутником. Во всех случаях предполагается, что удаленный терминал включен заблаговременно до включения аппаратуры дождевальной машины. В случае успешной связи с точками доступа происходит автоматическое подключение к мониторинговому серверу сети Интернет. Удаленный терминал считывает телеметрические данные либо непосредственно из дождевальной машины (в случае использования радиоканала), либо из определенного домена мониторингового сервера сети Интернет (в остальных случаях).

При этом телеметрические данные подвергаются следующим преобразованиям [14]:

- аналого-цифровое преобразование в датчиках физических величин;
- буферизация логическая (в памяти микроконтроллера) и виртуальная (в мониторинговом сервере);
- мультиплексирование и объединение потоков данных от датчиков в микроконтроллере;
- инкапсуляция при создании единого пакета данных для трансивера;
- шифрование, помехоустойчивое кодирование и модуляция пакетов данных трансивером;
- квитирование при активации канала связи;
- виртуализация телеметрических данных при их прохождении через сеть Интернет;
- демодуляция и фильтрация пакета данных телеметрии на трансивере принимающей стороны удаленного терминала;
- распараллеливание входного потока телеметрии при регистрации в базе данных терминала.

Предварительная обработка данных телеметрии перед отправкой их на терминал или в сеть Интернет позволяет снизить требования к каналам связи за счет устранения избыточности и сжатия данных.

### Заключение

Таким образом, для организации мониторинга работы дождевальной техники в режиме реального времени с учетом указанных требований необходимо оснащение дождевальных машин устройствами телеметрии с возможностью формирования ассоциированных комплексов данных и дистанционной передачи информации.

Предложенный тракт передачи телеметрической информации предусматривает многовариантность реализации системы телеметрии как в части используемых датчиков, так и в части типов радиоканалов — от открытого радиочастотного диапа-

зона до спутниковой связи. Наиболее оптимальной представляется реализация тракта с использованием датчиков параметров с проводными интерфейсами UART, 1-Wire, CAN и доступной сети сотовой связи.

#### Список литературы

1. Головинов Е. Э., Аминев Д. А., Максименко В. П., Филляев С. П. Устройство для измерения твердости почво-грунтов вращательным срезом (полезная модель). Патент РФ № 130710, 27.07.2013 г.
2. Голованов А. И. Мелиорация земель. М.: Колос, 2011. 824 с.
3. Шумаков Б. Б. Мелиорация и водное хозяйство. Орошение: Справочник. М.: Колос, 1999. 432 с.
4. Щедрин В. Н., Калганов А. В., Васильев С. М., Чураев А. А. Оросительные системы России: от поколения к поколению. Новочеркасск: Геликон, 2013. 590 с.
5. Аминев Д. А., Головинов Е. Э., Демьянков А. А. и др. Принцип расчета гидравлических характеристик работы дождевальной техники на всем цикле полива // Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий: материалы международной научно-технической конференции. М.: МИЭМ НИУ ВШЭ, 2013. С. 482—484.
6. Аминев Д. А., Головинов Е. Э., Кудрявцев Д. Ю. Телеметрия напора воды дождевальной техники на всем цикле полива // Качество. Инновации. Образование. 2014. № 11. С. 50—54.
7. Аминев Д. А., Головинов Е. Э. Создание модуля для регистрации и передачи данных при проведении полевых экспериментов // Мелиорация и проблемы восстановления сельского хозяйства России (Костяковские чтения). М.: Изд. ВНИИА, 2013. С. 115—120.
8. Аминев Д. А., Головинов Е. Э. Инновационный подход к проведению полевых экспериментов // Качество. Инновации. Образование. 2015. № 1. С. 26—30.

9. Головинов Е. Э., Аминев Д. А., Бакштанин А. М., Захаров А. В. Отечественный агромонитор для контроля работы сельскохозяйственной техники // Природообустройство. 2016. № 1. С. 52—57.
10. Головинов Е. Э., Лытов М. Н., Аминев Д. А. Технология управления орошением в режиме реального времени // Материалы IV международной конференции "Инновационные разработки молодых ученых — развитию агропромышленного комплекса": Сборник научных трудов. Ставрополь: ФГБНУ ВНИИОК, 2015. Т. 1. Вып. 8. С. 582—586.
11. Аминев Д. А., Головинов Е. Э., Увайсов С. У. Система мониторинга данных от датчиков веса и энкодеров // Международная научно-практическая конференция "ИНФО-2012". 2012. С. 485—486.
12. Пушкарев О. Использование диапазонов 433 и 868 МГц в системах промышленной телеметрии // Электронные компоненты. 2012. № 2. С. 42—48.
13. Аминев Д. А., Азизов Р. Ф., Увайсов С. У., Юрков Н. К. Определение оптимальных характеристик алгоритма конкурентного доступа к среде для минимизации времени передачи в децентрализованных беспроводных сетях // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2015. № 1. С. 101—107.
14. Аминев Д. А., Кондрашов А. В. Анализ и классификация методов преобразования потоков цифровых данных для высокоскоростных систем обработки и регистрации // Системы и средства связи, телевидения и радиовещания. 2012. № 1—2. С. 37—41.
15. Гук М. Аппаратные интерфейсы ПК. Энциклопедия. СПб.: Питер, 2002. 528 с.
16. Болл С. Р. Аналоговые интерфейсы микроконтроллеров. М.: Додэка-XXI, 2007. 360 с.
17. Лапин А. А. Интерфейсы. Выбор и реализация. М.: Техносфера, 2005. 168 с.
18. Елисеев Н. Интерфейс 1-Wire: устройство и применение // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2007. С. 94—99.
19. National Marine Electronics Association. URL: <http://www.nmea.org> (дата обращения: 04.04.16).
20. Вишневецкий В., Портной С., Шахнович И. Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G. М.: Техносфера, 2009. 472 с.

E. E. Golovinov, Leading Researcher, e-mail: evgeny@golovinov.info,

D. A. Aminev, Senior Researcher, e-mail: aminev.d.a@yandex.ru,

All-Russian Research Institute of Hydraulic Engineering and Land Reclamation named after A. N. Kostyakov,

I. I. Romanova, Senior Lecturer, e-mail: iromanova@hse.ru,

National Research University Higher School of Economics

## The Algorithm for Generating, Transmitting, and Processing of Monitoring Information from a Sprinkler on the Basis of Geographic Information Systems

*The problem of telemetry data acquisition units from a sprinkler and their trans-mission to the remote terminal on the various telecommunication channels is considered. The list of basic parameters, recorded by a sprinkler, is represented. The detailed diagram of data flow and block diagram of a processing algorithm, monitoring and recording the conversion information are given. The methods for converting data telemetry path are disclosed. The main standardized data transmission technology, used in the information transmission channel, is considered. The complexity of the information transmission channel implementation is estimated.*

**Keywords:** irrigation system, telemetry, information transmission channel, system of telecommunications

#### References

1. Golovinov E. E., Aminev D. A., Maksimenko V. P., Filyaev S. P. *Ustrojstvo dlja izmerenija tverdsti pochvo-gruntov vrashhatel'nyim srezom (poleznaja model')* (A device for measuring the hardness of soil and ground by a rotary cut (utility model)) / Patent RF no. 130710, 27.07.2013. (in Russian).
2. Golovanov A. I. *Melioracija zemel'* (Land reclamation), Moscow, Kolos, 2011. 824 p. (in Russian).

3. Shumakov B. B. *Melioracija i vodnoe hozjajstvo. Oroshenie: Spravochnik* (Melioration and water management. Irrigation: Handbook), Moscow, Kolos, 1999. 432 p. (in Russian).
4. Shchedrin V. N., Kolganov A. V., Vasiliev S. M., Churaev A. A. *Orositel'nye sistemy Rossii: ot pokolenija k pokoleniju: monografija* (Irrigation systems in Russia: from generation to generation: monograph), Novocherkassk, Gelikon, 2013. 590 p. (in Russian).
5. Aminev D. A., Golovinov E. E., Demyankov A. A. et al. *Princip rascheta gidravlicheskih harakteristik raboty dozhdval'noj tehniky na vsem cikle poliva* (The principle of calculating the hydraulic charac-

teristics of the operation of sprinkling equipment throughout the irrigation cycle), *Innovacii na osnovе informacionnyh i kommunikacionnyh tehnologij: materialy mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoi konferencii*, 2013, pp. 482—484. (in Russian).

6. **Aminev D. A., Golovin E. Je., Kudrjavcev D. Ju.** Telemetrija napora vody dozhdеval'noj tehniky na vsem cikle poliva (Telemetry of water pressure of sprinkling equipment in the whole irrigation cycle), *Kachestvo. Innovacii. Obrazovanie*, 2014, no. 11. pp. 50—54 (in Russian).

7. **Aminev D. A., Golovin E. Je.** Sozdanie modulja dlja registracii i peredachi dannyh pri provedenii polevyh jeksperimentov (Creation of a module for recording and transmitting data during field experiments), *Melioracija i problemy vosstanovlenija sel'skogo hozjajstva Rossii (Kostjakovskie chtenija)*, 2013, pp. 115—120 (in Russian).

8. **Aminev D. A., Golovin E. Je.** Innovacionnyj podhod k provedeniju polevyh jeksperimentov (Innovative approach to conducting field experiments), *Kachestvo. Innovacii. Obrazovanie*, 2015, no. 1, pp. 26—30. (in Russian).

9. **Golovin E. Je., Aminev D. A., Bakshtanin A. M., Zaharov A. V.** Otechestvennyj agromonitor dlja kontrolja raboty sel'skohozjajstvennoj tehniky (Domestic agronomist for monitoring the operation of agricultural machinery), *Prirodoobustrojstvo*, 2016, no. 1, pp. 52—57 (in Russian).

10. **Golovin E. Je., Lytov M. N., Aminev D. A.** Tehnologija upravlenija orosheniem v rezhime real'nogo vremeni (Technology of irrigation management in real time), *Materialy IV mezhdunarodnoj konferencii "Innovacionnye razrabotki molodyh uchenyh — razvitiju agropromyshlennogo kompleksa": Sbornik nauchnyh trudov*, 2015, vol. 1 (8), pp. 582—586 (in Russian).

11. **Aminev D. A., Golovin E. Je., Uvajsov S. U.** Sistema monitoringa dannyh ot datchikov vesa i jenkoderov (Data monitoring system from weight sensors and encoders), *Mezhdunarodnaja nauchno-prakticheskaja konferencija INFO-2012*, 2012, pp. 485—486 (in Russian).

12. **Pushkarev O.** Ispol'zovanie diapazonov 433 i 868 MHz v sistemah promyshlennoj telemetrii (Use of 433 and 868 MHz bands in industrial telemetry systems), *Jelektronnye komponenty*, 2012, no. 2, pp. 42—48 (in Russian).

13. **Aminev D. A., Azizov R. F., Uvajsov S. U., Jurkov N. K.** Opredelenie optimal'nyh charakteristik algoritma konkurentnogo dostupa k srede dlja minimizacii vremeni peredachi v decentralizovannyh besprovodnyh setjah (Determination of the optimal characteristics of the algorithm of competitive access to the environment for minimizing the transmission time in decentralized wireless networks), *Prikaspijskij zhurnal: upravlenie i vysokie tehnologii*, 2015, no. 1, pp. 101—107 (in Russian).

14. **Aminev D. A., Kondrashov A. V.** Analiz i klassifikacija metodov preobrazovanija potokov cifrovych dannyh dlja vysokoskorostnyh sistem obrabotki i registracii (Analysis and classification of methods for converting digital data streams for high-speed processing and recording systems), *Sistemy i sredstva svjazi, teledidenija i radioveshhanija*, 2012, no. 1—2, pp. 37—41 (in Russian).

15. **Guk M.** *Apparatnye interfejsy PK. Jenciklopedija* (Hardware interfaces of the PC. Encyclopedia), Sankt-Peterburg, Piter, 2002, 528 p. (in Russian).

16. **Boll S. R.** *Analogovye interfejsy mikrokontrollerov* (Analog interfaces of microcontrollers), Moscow, Dodjeka-XXI, 2007, 360 p. (in Russian).

17. **Lapin A. A.** *Interfejsy. Vybór i realizacija* (Interfaces. Selection and implementation), Moscow, Tehnosfera, 2005, 168 p. (in Russian).

18. **Eliseev N.** Interfejs 1-Wire: ustrojstvo i primenenie (1-Wire interface: assembly and application), *Jelektronika: Nauka, Tehnologija, Biznes*, 2007, pp. 94—99.

19. **National Marine Electronics Association**, available at: <http://www.nmea.org> (date of access: 04.04.16).

20. **Vishnevskij V., Portnoj S., Shahnovich I.** *Jenciklopedija WiMAX. Put' k 4G* (Encyclopedia of WiMAX. The way to 4G), Moscow, Tehnosfera, 2009, 472 p. (in Russian).

УДК 004.8:528.28

**В. Я. Цветков**, д-р техн. наук, проф., зам. руководителя, e-mail: cvj2@mail.ru,  
Центр стратегического анализа и развития,  
Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации,  
автоматизации и связи на железнодорожном транспорте (НИИАС), Москва

## Сходимость линейных пространственных задач

*Исследуется сходимость решения пространственных задач в геоинформатике и фотограмметрии. Рассмотрена проблема сходимости решения пространственных задач в геоинформатике и фотограмметрии. Раскрывается содержание понятия сходимость пространственных задач. Показано, что понятие "сходимость" решения пространственных задач аналогично понятию "точность" в метрологии. Рассмотрен вариант линейных пространственных задач. Вводятся четыре критерия сходимости: по координатам, по параметрам, методу по инвариантам. Раскрывается содержание каждого метода сходимости. Предложено для оценки "сходимости по координатам" использовать метрику Евклида, для оценки "сходимости по параметрам" — расстояние Махаланобиса. Для оценки сходимости по методу и инвариантам рекомендовано применение статистических методов оценивания.*

**Ключевые слова:** геоинформатика, прямая задача, обратная задача, пространственные модели, моделирование, сходимость

### Введение

Для большинства пространственных задач характерна двойственность [1]. Она состоит в том, что первоначально строится первая модель — модель измерений или условий съемки. Эта модель строится как искусственная модель в пространстве параметров условий измерений и параметров измерений. Затем по первой модели и результатам

измерений определяют координаты объекта в реальном пространстве (на местности). В этом варианте расчета также создается вторая модель — модель объекта. Вторая модель (объекта) строится в реальном пространстве. При решении пространственных задач (прямой и обратной засечек) в геоинформатике и, особенно, в фотограмметрии теория обходит стороной проблему сходимости. Чисто эмпириче-

ски задаются условия сходимости решений [2]. Однако теоретическое обоснование и оценка границ сходимости до настоящего времени не рассматривались.

### Анализ прямой и обратной задач

Прямая задача (задача 1) связана с получением решений  $\Psi$ , вычислением неких параметров решения  $P_A$  на основе известных условий  $U_1$ . Обратная задача (задача 2) связана с получением решений  $\Theta$ , вычислением неких параметров решения  $P_B$  на основе известных условий  $U_2$ , то есть чисто формально речь идет о схожих методах.

Прямыми и обратными задача 1 и задача 2 становятся при наличии связи между параметрами решений и параметрами условий в этих задачах. Эта связь двойственная. Параметры решения  $P_A$  задачи 1 включают параметры условий  $U_2$  задачи 2. Параметры решения  $P_B$  задачи 2 включают параметры условий  $U_1$  задачи 1. Термин "включение" допускает "эквивалентность" параметров, но является более широким. Задача 1 и задача 2 могут быть линейными и нелинейными. Если обе задачи линейные, то прямая и обратная задачи могут быть описаны в следующем виде.

$$\text{Задача 1: } \Psi U_1 = P_A(U_2); \quad (1)$$

$$\text{Задача 2: } \Theta U_2 = P_B(U_1). \quad (2)$$

Если  $\Psi$  и  $\Theta$  имеют матричную форму, то в этом случае

$$\Psi \Theta = I; \quad (3)$$

$$\Psi = \Theta^{-1}.$$

Здесь  $I$  — единичная матрица, а  $\Psi$ ,  $\Theta$  — прямая и обратная процедуры. Если уравнения (1), (2) линейны, говорят о линейной пространственной задаче. Если одно из уравнений (1), (2) нелинейно, или оба нелинейны, говорят о нелинейной пространственной задаче.

Рассмотрим линейную пространственную задачу на примере преобразования координат из плоскости снимка в плоскость объекта и обратно. Такая задача часто встречается при инженерных изысканиях и архитектурных обмерах [3], при восстановлении утраченных элементов памятника архитектуры, когда на момент восстановления существует часть объекта, а полное содержание изображено на снимке [4]. Также эта задача возникает при мониторинге реального объекта, например, фасада здания или иного инженерного сооружения. В ней необходимо по измеренным координатам снимка восстановить реальные координаты точек в плоскости объекта.

### Сходимость пространственной задачи по координатам и параметрам

В наземной фотограмметрии [2] принято использовать координаты  $X, Z$ . При этом  $Z$  обозна-

чает вертикальное направление,  $X$  — горизонтальное направление. Принято обозначать координаты на местности (объекта) ( $X, Z$ ) заглавными буквами, а координаты снимка маленькими (строчными) буквами ( $x, z$ ).

В фотограмметрии первоначально решают обратную задачу, т. е. определение параметров произвольно расположенного снимка по эталонным координатам точек на местности и на снимке [3, 5]. Эти параметры могут быть определены через так называемые элементы ориентирования снимка или через математические параметры трансформации. В последнем случае имеем линейную задачу, которая представлена в следующих выражениях:

$$x = \frac{A_1 X + A_2 Z + A_3}{A_7 X + A_8 Z + 1}; \quad (4)$$

$$z = \frac{A_4 X + A_5 Z + A_6}{A_7 X + A_8 Z + 1}. \quad (5)$$

Здесь  $X, Z$  — измеренные координаты точек на местности;  $x, z$  — измеренные координаты этих же точек на снимке. Постоянные коэффициенты  $A$  отражают связь  $\Theta$  местность  $\rightarrow$  снимок.

В выражения (4), (5) входят восемь постоянных коэффициентов  $A_i$ . Они задают однозначную связь между координатами плоскости объекта и снимка. Они линейно разрешимы относительно коэффициентов  $A_i$  при известных координатах объекта и снимка. Это выражается в том, что для их определения можно сформировать систему линейных уравнений:

$$\begin{aligned} A_1 X + A_2 Z + A_3 - A_7 X x - A_8 Z x &= x; \\ A_4 X + A_5 Z + A_6 - A_7 X z - A_8 Z z &= z. \end{aligned} \quad (6)$$

Пару уравнений (6) задает одна точка, координаты которой на местности и на снимке известны. Такие точки принято называть опорными. Следовательно, для определения восьми коэффициентов  $A_i$  необходимо минимум четыре опорных точки с известными координатами на снимке и объекте. С учетом погрешностей измерения (особенно для архивных снимков) реальное число таких точек должно лежать в пределах 12—16. Выражение (6) используют для получения "макетных" снимков. То есть для моделирования координат точек снимков при произвольно заданных координатах точек местности в определенной плоскости. При этом такая плоскость необязательно должна быть вертикальной. Важно, чтобы в ней была определена плоская Декартова система координат.

Точек объекта на снимке, как правило, много больше (от сотни и более), поэтому, измерив первоначально на объекте примерно 12 доступных точек, остальные точки можно определить вычислением по снимку. Для этого необходимо решать прямую фотограмметрическую задачу  $\Psi$ , т. е. определение координат объекта.

Замечательным свойством задачи  $\Psi$ , обратной задаче  $\Theta$ , является то, что в (4), (5) структура формул не меняется. Она заключается заменой коэффициентов  $A_i$  на  $B_i$ . Постоянные коэффициенты  $B$  отражают связь  $\Psi$  снимок  $\rightarrow$  местность. Для такого случая применяют аналитические выражения

$$X = \frac{B_1x + B_2z + B_3}{B_7x + B_8z + 1}, \quad (7)$$

$$Z = \frac{B_4x + B_5z + B_6}{B_7x + B_8z + 1}. \quad (8)$$

Выражения (7)–(8) линейно разрешимы относительно коэффициентов  $B_i$  при известных координатах объекта и снимка. Это выражается в том, что для их определения можно сформировать систему линейных уравнений, аналогичную (6):

$$\begin{aligned} B_1x + B_2z + B_3 - B_7Xx - B_8Zx &= X; \\ B_4x + B_5z + B_6 - B_7Xz - B_8Zz &= Z. \end{aligned} \quad (9)$$

Эта система является линейной относительно коэффициентов  $B$  и является полным аналогом (6), т. е. вычислительный алгоритм для обеих задач один и тот же. Дополнительные исследования [4] выявили связь между коэффициентами  $A_i$  и  $B_i$ , которая определяется с помощью выражений [4]

$$\begin{aligned} B_1 &= (A_5 - A_6A_8)/TT; \quad B_2 = (A_3A_8 - A_2)/TT; \\ B_3 &= (A_6A_2 - A_3A_5)/TT; \quad B_4 = (A_7A_6 - A_1)/TT; \\ B_5 &= (A_1 - A_7A_3)/TT; \quad B_6 = (A_4A_3 - A_1A_6)/TT; \\ B_7 &= (A_4A_8 - A_7A_5)/TT; \quad B_8 = (A_2A_7 - A_1A_2)/TT, \end{aligned} \quad (10)$$

где

$$TT = (A_1A_5 - A_2A_4).$$

Выражения (10) инвариантны относительно замены коэффициентов  $A_i$  и  $B_i$ . На рис. 1 показан объект и два типа точек с известными координатами.

Сходимость данной пространственной задачи определяется разными путями. Первый путь с помощью контрольных точек. Контрольные точки являются аналогами опорных, но не участвуют в расчетах коэффициентов по формулам (6) или (9). Координаты контрольных точек на местности —  $X_k, Z_k$  и на снимке —  $x_{к.р}, z_{к.р}$  известны. Механизм оценки сходимости имеет два варианта. Первый вариант включает нахождение коэффициентов  $A$  с помощью координат опорных точек по формулам (6).

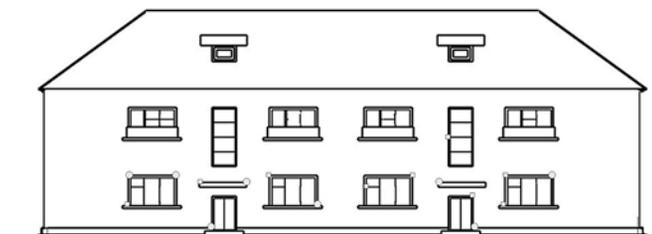


Рис. 1. Опорные (кружки) и контрольные (квадраты) точки на объекте

Затем в формулы (4), (5) подставляют координаты местности контрольных точек  $X_k, Z_k$  и вычисляют расчетные значения контрольных точек на снимке  $x_{к.р}, z_{к.р}$ . Расхождения

$$d_x = x_{к.р} - x_k; \quad d_z = z_{к.р} - z_k. \quad (11)$$

Являются оценкой сходимости решения по координатам снимка.

Подобные оценки можно получить с использованием выражений (9) и (7), (8). Расхождения

$$D_x = X_{к.р} - X_k; \quad D_z = Z_{к.р} - Z_k \quad (12)$$

являются оценкой сходимости решения пространственной задачи по координатам объекта. Оба метода оценки сходимости (11) и (12) можно назвать координатными.

Еще один вариант оценки сходимости, который можно назвать параметрическим, основан на сравнении коэффициентов  $A_i$  и  $B_i$ . В этом варианте используют только опорные точки. Он применим при отсутствии контрольных точек. Определяют коэффициенты  $A_i$  и  $B_i$  по формулам (6) и (9). Затем находят эти же коэффициенты  $B_{pi}$  по формулам (11) через рассчитанные коэффициенты  $A$ .

Расхождения

$$D_B = B_{pi} - B_i \quad (13)$$

являются оценкой сходимости решения по параметрам преобразования. Таким образом, сходимость пространственных задач может быть определена как мера совпадения координат опорных точек, вычисляемых прямым и обратным методами, или мера совпадения параметров для прямой и обратной задач через формулы связи между ними. В этой трактовке понятие сходимости полностью коррелирует с понятием точности стандарта метрологии.

Можно упомянуть работу [7], в которой чисто формально исследована проблема сходимости. В ней упоминается сходимость, но определение сходимости не дано. Вместо сходимости пространственных задач рассмотрена сходимость рядов [8], которая к пространственным задачам не привязана. Можно констатировать, что заявленная по заголовку задача не решена. Следует отметить, что обратная задача (7), (8) решается так же, если задано уравнение плоскости объекта. В этом случае координаты опорных точек не требуются.

### Сходимость пространственной задачи по методам

В аналитической геометрии существует двойственность между координатами точек прямых и параметрами прямых [6]. Эта двойственность не используется в решении пространственных задач и ее обходят стороной технологи и изыскатели. На практике, при изысканиях и обмерах фасадов измеряют только точки и не измеряют наклоны кривых. В то же время при съемке инженерных объектов или памятников архитектуры на этих объектах существуют

не только отдельные точки, но и совокупность прямых линий. Это линии окон, дверей, диагонали окон и дверей и т. д. Вертикальные и горизонтальные линии являются естественными границами фасада объекта и элементами (информационными единицами) объекта. Таким образом, на реальных объектах имеется дополнительная информация о параметрах прямых линий, которая не используется.

Каждая линия характеризуется двумя точками. Точка как результат пересечения линий характеризуется также двумя линиями. Такая двойственность, известная в аналитической геометрии [6], дает основание искать параметры связи между снимком и объектом не только по координатам точек снимка и координатам плоскости объекта, но и по параметрам прямых линий плоскости объекта и параметрам изображения этих прямых на снимке.

Анализ этого вопроса [5] позволил создать новое решение прямой и обратной пространственных задач. Идеи этого подхода заложены в переходе от пространства координат к пространству параметров. Было выявлено, что если уравнение линии на снимке (наземная съемка) имеют вид

$$z = kx + h,$$

а на объекте (местности)

$$Z = KX + H,$$

то между  $K$ ,  $H$  (параметры прямых на объекте) и  $k$ ,  $h$  (параметры прямых на снимке) существуют связи, подобные связям между  $X$ ,  $Z$  (координаты точек объекта) и  $x$ ,  $z$  (координаты этих же точек на снимке).

Здесь  $k$  и  $K$  — угловые коэффициенты прямых линий на снимке и на фасаде объекта,

$$K = \frac{P_1 k + P_2 h + P_3}{P_7 k + P_8 h + 1}, \quad (14)$$

$$H = \frac{P_4 k + P_5 h + P_6}{P_7 k + P_8 h + 1}, \quad (15)$$

где  $P_i$  — постоянные коэффициенты, аналоги коэффициентов  $B$  из (7), (8). Такой подход позволил по-новому решить задачу получения параметров модели объекта.

На практике часто  $K = 0$ ,  $H = Z - \text{const}$  для горизонтальных линий. Такой метод позволяет находить связь между снимком и плоскостью объекта при отсутствии опорных точек, но при известных высотах некоторых горизонтальных линий по перспективным снимкам.

Для диагонали окна или двери на фасаде  $K$  имеет вычисляемое значение. Наличие совокупности известных или измеренных вертикальных, горизонтальных и наклонных линий на объекте позволяет находить параметры  $P_i$  с помощью системы уравнений (14), (15). Для этого на объекте должно быть не менее восьми прямых линий. В том случае если известны параметры наклонных линий, то их число должно быть не менее четырех.

Определение параметров линий по снимку можно выполнять с высокой точностью за счет избыточности измерений точек на линиях сканированного изображения. Для определения параметров линий можно использовать автоматизированные процедуры распознавания границ контуров. Эти процедуры можно выполнять в автоматизированном или ручном режиме с анализом достаточности и точности данных.

Вычислив параметры прямых линий на объекте, можно найти координаты точек пересечения этих линий. То есть при отсутствии опорных точек можно находить координаты точек на объекте, но только те, которые являются пересечением прямых линий. Это угловые точки окон, дверей и прямоугольных или треугольных орнаментов и пр.

Механизм оценки сходимости в этом случае основан на сравнении координат  $X$ ,  $Z$ , вычисленных методом (7), (8), и координат  $X_{\text{л}}$ ,  $Z_{\text{л}}$ , определенных данным методом по наклонным линиям. Расхождения

$$D_x = X_{\text{л}} - X; D_z = Z_{\text{л}} - Z \quad (16)$$

являются оценкой сходимости решения разными методами. Следует отметить принципиальную возможность оценки сходимости по вычислениям или измерениям с помощью разных методов. Например, координаты точек, входящих в (16), могут быть не вычислены, а измерены. Это часто делают архитекторы-реставраторы при проверке аналитического метода.

### Сходимость пространственной задачи по инвариантам

Сходимость пространственной задачи может быть оценена по инвариантам, которые делят на локальные и общие. Инвариант не зависит от объекта, а основан на существующей закономерности. Локальный инвариант связан с закономерностями объекта, например, отметка верхней или нижней части разных, но геометрически одинаковых окон одного этажа на фасаде (см. рис. 1), должна быть одинаковой. На каждом объекте можно найти свой локальный инвариант. В архитектуре такие инварианты связаны с "золотым сечением" или с числами Фибоначчи.

Другой тип инварианта — общий связан с закономерностями геометрических преобразований и является общим для разных объектов. Этот инвариант использует закономерность того, что центральные проекции параллельных линий объекта на наклонную плоскость образуют пучок непараллельных прямых, имеющих одну точку пересечения. Эта точка называется точкой схода. При больших наклонах снимка она может лежать в пределах снимка, при малых — за его пределами. Точка схода вычисляется с помощью методов геометрии как точка пересечения прямых линий. Как правило, для пространственного трехмерного объекта на проекции

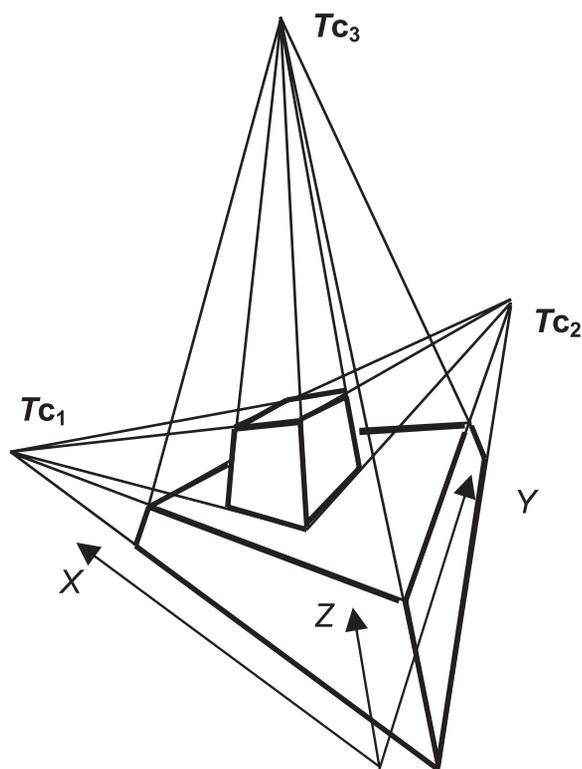


Рис. 2. Точки схода для трехмерных объектов прямоугольной формы

(снимке) может быть три точки схода. Наглядной моделью таких объектов является параллелепипед, более сложным вариантом — конструкция мавзолея на Красной площади. Перспективные изображения линий в трех разных группах плоскостей и их продолжений на снимке характеризуются наличием трех точек схода. Их положение показано на рис. 2.

Замечательным является то, что в точке схода пересекаются параллельные прямые, лежащие в разных параллельных плоскостях (рис. 2) объекта. Каждый пространственный объект имеет три измерения, которые отображаются на осях координат, связанных с объектом. Три взаимно перпендикулярные плоскости, задающие системы координат, можно назвать базисными, поскольку они определяют базис объекта в пространстве. Если одна из плоскостей объекта параллельна плоскости фотоснимка, то параллельные линии для такой плоскости переходят в параллельные линии на снимке и точка схода для них лежит в бесконечности.

В том случае если ни одна из базисных плоскостей не параллельна плоскости фотоснимка, все три точки схода имеют конечные координаты. Таким образом, при перспективной съемке трехмерного объекта на снимке (или за его пределами) существуют три точки  $T_{c1}$ ,  $T_{c2}$ ,  $T_{c3}$  (рис. 2). Эти точки можно определить как геометрическое место точек, в которых пересекаются три группы изображений прямых на снимке или центральной проекции. Эти группы изображений прямых соответ-

ствуют трем группам взаимно перпендикулярных линий на трехмерном объекте. Координаты точек  $T_{c1}$ ,  $T_{c2}$ ,  $T_{c3}$  (см. рис. 2) можно определить независимо от измерений на объекте и наличия опорных точек. Они задают дополнительную связь между точками снимка, которую можно использовать для оценки сходимости измерений по снимку и оценки качества изображения. Применение данного подхода эффективно при автоматизированных методах обработки снимков, поскольку в этом случае легко получить большое количество точек, что обуславливает более высокую точность в сравнении с ручными измерениями. Ограничение применимости метода состоит в условии, чтобы плоскость снимка не была параллельна ни одной из базисных плоскостей. Оценка точности [3] показала, что метод применим при углах наклона плоскости снимка к одной из осей, равных не менее  $10^\circ$ .

### Дискуссия

Сходимость связана с качеством измерений и вычислений и может служить средством для оценки качества работ в геоинформатике, фотограмметрии и геодезии. В настоящее время для этой цели широко используют понятие погрешности и дисперсии. Сходимость пространственных задач в отличие от погрешности не может быть определена одним понятием. Она различается в зависимости от метода и величин, которые служат оценкой сходимости. Концептуально понятие сходимости может быть определено как мера точности. В этом понимании сходимость близка к метрологическому понятию "точность" [9]. Для координатной сходимости мерой оценки может служить Евклидова метрика [10]. Для методической сходимости в качестве оценки можно использовать расстояние Махаланобиса [11]. Для методической оценки сходимости можно использовать аппарат кластерного анализа [12]. При этом сходимость рассматривается как "близость". Для инвариантной сходимости можно использовать методы математической статистики. Сходимость пространственных задач может получать дополнительные формы и дефиниции. В данной работе рассмотрены только линейные пространственные задачи. Для нелинейных задач могут появиться другие виды сходимости. Они могут быть связаны с оценкой итераций при последовательных приближениях, с заикливанием, с числовыми рядами и т. д. Исследование сходимости нелинейных пространственных задач является предметом дальнейших исследований.

### Заключение

Сходимость является важной характеристикой, которой до настоящего времени в науках о Земле и при решении пространственных задач не уделялось достаточного внимания. Сходимость является

полисемической характеристикой и подразделяется на разные виды. Координатная сходимость применима к измерениям на объекте и измерениям на снимке. Она является вычислительной характеристикой. Методическая сходимость дает возможность сравнивать разные методы между собой по их результатам. Она является методической и вычислительной характеристикой. Инвариантная сходимость основана на существующих в природе или в построениях закономерностях. Она является методической и вычислительной характеристикой. Использование закономерностей позволяет оценивать сходимость метода и результата измерений. Сходимость пока не включена в список характеристик качества измерений и вычислений. Но, по нашему мнению, она может быть использована для этой цели подобно тому, как точность при стрельбе является дополнительной характеристикой оценки результатов, наряду с погрешностью.

#### Список литературы

1. **Геодезия**, картография, геоинформатика, кадастр: Энциклопедия. В 2-х т. М.: Геодезкартгиздат, 2008. Т. I. 496 с.

2. **Краснопецев Б. В.** Фотограмметрия. М.: Изд-во МИИГАиК, 2008. 160 с.
3. **Иванников А. Д., Кулагин В. П., Тихонов А. Н., Цветков В. Я.** и др. Прикладная геоинформатика. М.: МАКС Пресс, 2005. 360 с.
4. **Цветков В. Я., Ходорович Е. А.** Составление обмерных чертежей архитектурных памятников с использованием архивных фотоснимков. М.: МК РСФСР, Росреставрация, 1986. 52 с.
5. **Цветков В. Я.** Трансформирование координат точек снимков при дополнительных условиях // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 1998. № 3. С. 150—155.
6. **Моденов П. С.** Аналитическая геометрия. М.: Изд-во МГУ, 1969. 698 с.
7. **Лобанов А. Н.** Сходимость обратных задач в геодезии // Славянский форум. 2014. № 2 (6). С. 67—71.
8. **Демидович Б. Н., Марон И. А.** Основы вычислительной математики. М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1963. 660 с.
9. **ГОСТ Р ИСО 5725-1—2002.** Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 1. Основные положения и определения. М.: Стандартинформ, 2009.
10. **Математика.** Серия: Большие энциклопедические словари / Под ред. Ю. В. Прохорова. М.: Большая Российская энциклопедия (БРЭ), 2000. 848 с.
11. **De Maesschalck R., Jouan-Rimbaud D., Massart D. L.** The Mahalanobis distance // Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems. 2000. Vol. 50. P. 1—18.
12. **Воронцов К. В.** Алгоритмы кластеризации и многомерно-го шкалирования. Курс лекций. М.: Изд-во МГУ, 2007. 120 с.

**V. Ya. Tsvetkov, D. Sc.,** Professor, Deputy Head, e-mail: cvj2@mail.ru,  
Center for Strategic Analysis and Development, Research and Design Institute of Design Information,  
Automation and Communication on Railway Transport, Moscow, Russia

## Convergence of Linear Spatial Tasks

*The article explores the convergence of the solution of spatial problems in geoinformatics and photogrammetry. The article analyzes the problem of convergence of the solution of spatial problems in geoinformatics and photogrammetry. The article reveals the content of the concept of "convergence" of spatial problems. The article proves that the concept of "convergence" of the solution of spatial problems is analogous to the notion of "accuracy" in metrology. The article explores linear spatial problems. The article offers four criteria for convergence: in coordinates, in parameters, in the invariant method. The article reveals the content of each method of convergence. The article proposes to use the Euclidean metric to estimate "convergence in coordinates". The article proposes using the Mahalanobis distance for estimating "convergence by parameters". The article suggests the use of statistical estimation methods for estimating the convergence by the method and invariants.*

**Keywords:** geoinformatics, direct problem, inverse problem, spatial models, modeling, convergence

#### References

1. **Геодезия, картография, геоинформатика, кадастр: Энциклопедия**, Moscow, Geodezcartizdat, 2008, vol. I, 496 p. (in Russian).
2. **Krasnopecev B. V.** *Fotogrammetrija*, Moscow, MIIGAiK, 2008 (in Russian).
3. **Ivannikov A. D., Kulagin V. P., Tikhonov A. N., Cvetkov V. J.** *Prikladnaja geoinformatika*, Moscow, MAKS Press, 2005, 360 p. (in Russian).
4. **Cvetkov V. Ja., Hodorovich E. A.** Sostavlenie obmernyh chertezhej arhitekturnyh pamjatnikov s ispol'zovaniem arhivnyh fotosnimkov, Moscow, MK RSFSR, Rosrestavracija, 1986, 52 p. (in Russian).
5. **Cvetkov V. Ja.** Transformirovanie koordinat toček snimkov pri dopolnitel'nyh uslovijah, *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Geo-dezija i ajerofotos#emka*, 1998, no. 3, pp. 150—155 (in Russian).
6. **Modenov P. S.** Analiticheskaja geometrija, Moscow, Izd-vo MGU, 1969, 698 p. (in Russian).

7. **Lobanov A. N.** Shodimost' obratnyh zadach v geodezii, *Slavjanskij forum*, 2014, no. 2 (6), pp. 67—71 (in Russian).
8. **Demidovich B. N., Maron I. A.** *Osnovy vychislitel'noj matematiki*, Moscow, Gosudarstvennoe izdatel'stvo fiziko-matematicheskij literatury, 1963. 660 p. (in Russian).
9. **ГОСТ Р ИСО 5725-1—2002.** Točnost' (pravil'nost' i precizionnost') metodov i rezul'tatov izmerenij. Chast' 1. Osnovnyje položeniija i opredelenija. Moscow, Standartinform, 2009.
10. **Математика.** Serija: Bol'shie jenciklopedicheskie slovori / Ed. Ju. V. Prohorov, Moscow, Bol'shaja Rossijskaja jenciklopedija (BRJe), 2000, 848 p. (in Russian).
11. **De Maesschalck R., Jouan-Rimbaud D., Massart D. L.** The Mahalanobis distance, *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*. 2000, vol. 50, pp. 1—18.
12. **Voroncov K. V.** *Algoritmy klasterizacii i mnogomernogo shkalinovanija*, Kuzs lekcij, Moscow, MGU, 2007. 120 p. (in Russian).

## Метод оптимальной энтропийной кластеризации на базе нового определения интересности атрибута состояния элементов сообщения. Часть 1. Теоретическое обоснование

*Предложено новое определение интересности атрибута состояния элементов сообщения. Предлагаемое определение интересности определяет то количество информации, на которое повысилось бы количество информации в сообщении при распространении данного атрибута на все элементы сообщения. Сформулирована задача оптимальной энтропийной кластеризации на базе нового определения интересности атрибута состояния элемента сообщения. Решение данной задачи позволяет формировать в теоретическом плане режим оптимальной кластеризации. На базе разработанного метода оптимальной энтропийной кластеризации предложено правило сокращения признакового пространства элементов сообщений. Результаты экспериментальных и модельных исследований по опробованию предложенного метода будут изложены во второй части статьи по данной тематике.*

**Ключевые слова:** кластер, информация, энтропия, оптимизация, сообщения, атрибут

Как отмечается в работе [1], одними из основных задач анализа данных являются классификация и кластеризация. Решение задачи классификации позволяет обнаружить признаки, характеризующие группы объектов исследуемого набора данных, и по этим признакам исследуемый объект относится к одному из классов. Задача кластеризации заключается в разбиении объектов на группы. Согласно работе [2] выбор компонентов для уменьшения объема входных данных для обработки и анализа означает процесс извлечения полезной информации из существующих данных. При кластеризации для каждого атрибута должна быть использована оценка "интересности" [3–6]. При этом, согласно [7], мера интересности основана на энтропии, а это означает, что атрибуты, характеризующиеся случайными распределениями, имеют более высокую энтропию и меньшее значение прироста информации, т. е. являются менее интересными. Энтропия конкретного атрибута сравнивается с энтропией всех других атрибутов. Разность указанных энтропий показывает степень информативности рассматриваемого атрибута. Согласно [8–10] интересность атрибута определяется по следующей формуле:

$$\begin{aligned} \text{Интересность(Атрибут)} &= \\ &= -(m - \text{Энтропия(Атрибут)}) \times \\ &\times (m - \text{Энтропия(Атрибут)}), \end{aligned} \quad (1)$$

$m$  — энтропия всего набора атрибутов.

Недостаток определения интересности по формуле (1), как нам представляется, заключается в

неучете роли элементов данных, характеризующихся атрибутами или признаками.

С учетом вышесказанного предлагается следующее определение интересности:

$$\text{Интересность}^{(1)}(\text{Атрибут}) = M_1 - M_2; \quad (2)$$

где

$$M_1 = N(\text{Энтропия(Атрибут)}); \quad (3)$$

$$M_2 = n(\text{Энтропия(Атрибут)}); \quad (4)$$

$N$  — общее число элементов сообщения;  $n$  — число элементов, обладающих данным атрибутом.

Таким образом, предлагаемое определение интересности определяет то количество информации, на которое повысилось бы количество информации в сообщении при распространении данного атрибута на все элементы сообщения.

Предлагаемый в настоящей работе метод кластеризации базируется на энтропийной оценке атрибутов.

Если дано некоторое множество элементов  $Z_j$ ,  $j = (\overline{1, \chi})$  и определены кластеры

$$T(y_i); i = (\overline{1, m}), \quad (5)$$

то согласно порядка определения кластеров, в кластер  $T(y_i)$  будем включать те элементы сообщения, которые имеют  $y_i$  состояний.

Общее количество информации, определяющее интересность элементов в кластере  $T(y_i)$ , запишем как

$$M_i = (N - n_i) \log_2 y_i. \quad (6)$$

Суммирование (6) по всем  $i$  дает следующее выражение:

$$\sum_{i=1}^m M_i = \sum_{i=1}^m (N - n_i) \log_2 y_i. \quad (7)$$

Кластеризация элементов  $z$  по кластерам считается оптимальной, если выполнен следующий порядок отнесения элементов в количестве  $n_i$  в кластер  $T(y_i)$ .

1. Допускается функциональная связь между  $n_i$  и  $y_i$ :

$$y_i = \psi(n_i). \quad (8)$$

2. Наложено следующее ограничение на сумму

$$\sum_{i=1}^m \psi(n_i):$$

$$\sum_{i=1}^m \psi(n_i) = C; \quad C = \text{const}. \quad (9)$$

3. При оптимальной кластеризации элементов сообщения общее количество информации, вычисляемое по выражению

$$\Phi_{\text{д}} = \sum_{i=1}^m (N - n_i) \log_2 \psi(n_i) + \gamma \sum_{i=1}^m \psi(n_i), \quad (10)$$

где  $\gamma$  — множитель Лагранжа достигает экстремального значения при вычисленной оптимальной функции  $\psi(n_i)$ .

Для вычисления оптимальной функции  $\psi(n)$  выражение (10) запишем в непрерывной форме:

$$\Phi_{\text{н}} = \int_0^{n_m} (N - n) \log_2 \psi(n) dn + \int_0^{n_m} \psi(n) dn \quad (11)$$

при

$$\int_0^{n_m} \psi(n) dn = C_1, \quad (12)$$

где  $C_1 = \text{const}$ ;  $n_m$  — максимальное число элементов в каком-либо кластере.

Известно [11], что функционал (11) достигает экстремума при такой оптимальной функции  $\psi(n)_{\text{опт}}$ , которая удовлетворяет условию Эйлера:

$$W_1 = \frac{d[(N - n) \log_2 \psi(n) + \gamma \psi(n)]}{d\psi(n)} = 0. \quad (13)$$

С учетом выражений (11) и (13) получаем

$$\frac{(N - n)}{\psi(n) \ln 2} + \gamma = 0. \quad (14)$$

Из выражения (14) находим

$$\psi(n) = -\frac{(N - n)}{\gamma \ln 2}. \quad (15)$$

С учетом выражений (12) и (15) получим

$$-\int_0^{n_m} \frac{(N - n)}{\gamma \ln 2} dn = C_1. \quad (16)$$

Из выражения (16) имеем

$$-\frac{N n_m}{\gamma \ln 2} + \frac{n_m^2}{2\gamma \ln 2} = C_1. \quad (17)$$

С учетом (17) находим следующее выражение для вычисления множителя Лагранжа:

$$\gamma = \frac{n_m^2}{2C_1 \ln 2} - \frac{N n_m}{C_1 \ln 2}. \quad (18)$$

С учетом выражений (14) и (18) находим

$$\frac{N - n}{\psi(n)} = \frac{N n_m}{C_1} - \frac{n_m^2}{2C_1}. \quad (19)$$

Из выражения (19) окончательно получим формулу для оптимальной функции  $\psi(n)_{\text{опт}}$ :

$$\psi(n)_{\text{опт}} = \frac{N - n}{\frac{n_m}{C_1} \left( N - \frac{n_m}{2} \right)}. \quad (20)$$

Таким образом, при оптимальном виде функции  $\psi(n)$ , определяемой выражением (20), функционал (11) достигает экстремального значения. Проверка типа экстремума осуществляется по критерию знака следующего выражения:

$$W_2 = \frac{d^2[(N - n) \log_2 \psi(n) + \gamma \psi(n)]}{d\psi(n)^2}. \quad (21)$$

Легко показать, что  $W_2$  является отрицательной величиной, т. е. функционал (11) при решении (20) достигает максимального значения. С учетом выражений (11) и (20) максимально достижимое значение  $\Phi_{\text{н}}$  определим как

$$\Phi_{\text{н.макс}} = \int_0^{n_m} (N - n) \log_2 \frac{N - n}{\frac{n_m}{C_1} \left( N - \frac{n_m}{2} \right)} dn + C_1. \quad (22)$$

На основании полученного выражения (22) можно предложить следующий метод кластеризации.

1. Вычислить  $\Phi_{\text{н.макс}}$  по выражению (22).
2. Вычислить  $\Phi_{\text{н}}$ , используя выражения (11) и (12) при функции  $\psi(n)_{\text{пот}}$ , характеризующей элементы потенциального кластера.
3. Вычислить разность

$$\Delta\Phi = \int_0^{n_m} (N - n) \log_2 \frac{N - n}{\frac{n_m}{C_1} \left( N - \frac{n_m}{2} \right)} dn - \int_0^{n_m} (N - n) \log_2 \psi(n)_{\text{П}} dn. \quad (23)$$

Критерий сокращения признакового пространства формируется следующим образом.

При выполнении условия  $\Delta\Phi \geq C_2$ , где  $C_2$  — исходно заданная величина, элементы  $y_i$  с числом состояний, определяющих величину  $\psi(n)_{\text{пот}}$ , могут быть исключены из рассмотрения.

Таким образом, разработанный метод оптимальной энтропийной кластеризации на базе нового определения интересности атрибута (признака) состояния элемента сообщения позволяет формировать режим оптимальной кластеризации и сформулировать правило сокращения признакового пространства. Результаты экспериментальных и модельных исследований по опробованию предлагаемого метода кластеризации будут представлены во второй статье.

Основные выводы проведенного исследования могут быть сформулированы следующим образом.

1. Предложено новое определение интересности атрибута состояния элементов сообщения.
2. Разработан метод оптимальной энтропийной кластеризации на базе предложенного нового определения интересности атрибута.
3. Предложено правило сокращения признакового пространства элементов сообщений.

#### Список литературы

1. **Data Mining** — технология добычи данных. URL: <http://bourabai.ru/tpoi/datamining.htm>

2. **Выбор** компонентов (интеллектуальный анализ данных). URL: [http://msdn.microsoft.com/ru-ru/library/ms175382\(d=printer\).aspx](http://msdn.microsoft.com/ru-ru/library/ms175382(d=printer).aspx)

3. **Zimmermann A.** Objectively evaluating interestingness measures for frequent item set mining. URL: <http://zimmermann.users.greyc.fr/papers/international-workshops/pakdd2013objectively-evaluating.pdf>

4. **Sahar S.** What is interesting: studies on interestingness in knowledge discovery. A dissertation submitted for the degree of "Doctor of Philosophy". URL: <http://www.cs.tau.ac.il/~mansour/students/SigalSaharPhD.pdf>

5. **Tew C., Giraud — Carrier C., Tanner K., Burton S.** Behavior — based clustering and analysis of interestingness measures for association rule mining. URL: [http://dml.cs.byu.edu/~cgc/docs/mlm\\_tools/Slides/10.1--7\\_s10618-013-0326-x.pdf](http://dml.cs.byu.edu/~cgc/docs/mlm_tools/Slides/10.1--7_s10618-013-0326-x.pdf)

6. **Nuyh X.-H.** Interestingness measures for association rules in a KDD Process: Post-Processing of Rules with ARQAT Tool. Computer Science [cs]. Universite de Nantes, 2006.

7. **Malik H. H., Kender J. R.** Instance Driven Hierarchical Clustering of Document Collections. URL: <http://www.ke.tu-darmstadt.de/events/LeGo-08/8.pdf>

8. **Bie T. D.** Subjective interestingness in exploratory data mining. URL: [http://www.tijldebbe.net/system/files/IDA\\_tijl.pdf](http://www.tijldebbe.net/system/files/IDA_tijl.pdf)

9. **Geng L., Hamilton H. J.** Interestingness Measured for Data Mining: A Survey. URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.594.7759&rep=rep1&type=pdf>

10. **Qingbao L., Wanjun W., Su D.** An equivalence class based clustering algorithm for categorical data. URL: [http://knoesis.wright.edu/sites/default/files/immm\\_2011\\_6\\_40\\_20162/pdf](http://knoesis.wright.edu/sites/default/files/immm_2011_6_40_20162/pdf)

11. **Эльгольц Л. П.** Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление. М.: Наука, 1974. 432 с.

**B. H. Askerova**, Associate Professor,

Azerbaijan State University of Oil and Industry, e-mail: [Bahar287@mail.ru](mailto:Bahar287@mail.ru)

## Method of Optimum Entropy Clustering on the Basis of New Determination of Interestness of the Attribute of Elements of Data

*One of major tasks of data analysis is classification and clustering. Classification make it possible to reveal the signs of group of objects of researched data set and assign the researched object to one of classes using these attributes. Upon clustering the distribution of objects on groups is carried out. In this case the assessment of each attribute is calculated as a distance and such estimate as "interestingness" of the attribute is applied. The measure of interestingness is based on entropy, therefore the attributes characterized by random distribution possesses the higher entropy and lower increment of information, i.e. are less interesting. But in this case the role of elements of data characterized by attributes are not taken into account. The new determination of interestingness of attribute of data elements position is suggested. The suggested determination of interestingness determines the amount of information equal to possible increment of amount of information in data if this attribute would be applied to all elements of data. The task of optimum entropy clustering on the basis of new determination of the attribute interestingness of data element position is formulated. Solution of this task make it possible to formulate the regime of optimum clustering. On the basis of developed method of optimum entropy clustering the new technique for removal of data elements attributes space is suggested. Results of experimental and model researches on testing of the suggested method will be described in the second article on this theme.*

**Keywords:** cluster, information, entropy, optimization, data, attribute

#### References

1. **Data Mining**. URL: <http://bourabai.ru/tpoi/datamining.htm>

2. **Feature Selection (Data Mining)**. URL: [http://msdn.microsoft.com/ru-ru/library/ms175382\(d=printer\).aspx](http://msdn.microsoft.com/ru-ru/library/ms175382(d=printer).aspx)

3. **Zimmermann A.** Objectively evaluating interestingness measures for frequent item set mining. URL: <http://zimmermann.users.greyc.fr/papers/international-workshops/pakdd2013objectively-evaluating.pdf>

4. **Sahar S.** What is interesting: studies on interestingness in knowledge discovery. A dissertation submitted for the degree of "Doctor of Philosophy". URL: <http://www.cs.tau.ac.il/~mansour/students/SigalSaharPhD.pdf>

5. **Tew C., Giraud-Carrier C., Tanner K., Burton S.** Behavior — based clustering and analysis of interestingness measures for association rule mining. URL: [http://dml.cs.byu.edu/~cgc/docs/mlm\\_tools/Slides/10.1--7\\_s10618-013-0326-x.pdf](http://dml.cs.byu.edu/~cgc/docs/mlm_tools/Slides/10.1--7_s10618-013-0326-x.pdf)

6. **Nuyh X.-H.** Interestingness measures for association rules in a KDD Process: Post-Processing of Rules with ARQAT Tool. Computer Science [cs]. Universite de Nantes, 2006.

7. **Malik H. H., Kender J. R.** Instance Driven Hierarchical Clustering of Document Collections. URL: <http://www.ke.tu-darmstadt.de/events/LeGo-08/8.pdf>

8. **Bie T. D.** Subjective interestingness in exploratory data mining. URL: [http://www.tijldebbe.net/system/files/IDA\\_tijl.pdf](http://www.tijldebbe.net/system/files/IDA_tijl.pdf)

9. **Geng L., Hamilton H. J.** Interestingness Measured for Data Mining: A Survey. URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.594.7759&rep=rep1&type=pdf>

10. **Qingbao L., Wanjun W., Su D.** An equivalence class based clustering algorithm for categorical data. URL: [http://knoesis.wright.edu/sites/default/files/immm\\_2011\\_6\\_40\\_20162/pdf](http://knoesis.wright.edu/sites/default/files/immm_2011_6_40_20162/pdf)

11. **Jel'egol'c L. P.** Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление, Moscow, Nauka, 1974, 432 p. (in Russian).

УДК 519.6

**И. В. Басов**<sup>1</sup>, студент, e-mail: generalrot@rambler.ru,  
**С. В. Грошев**<sup>2</sup>, ст. преподаватель, e-mail: groshev\_sergey@mail.ru,  
**А. П. Карпенко**<sup>3</sup>, д-р физ.-мат. наук, проф., зав. кафедрой, e-mail: apkarpenko@mail.ru,  
**К. В. Шайтан**<sup>3</sup>, д-р физ.-мат. наук, проф., e-mail: shaytan49@yandex.ru,  
**Д. Л. Шуруп**<sup>4</sup>, аспирант, e-mail: d.l.shurov@gmail.com,

<sup>1</sup> Московский институт государственного и муниципального управления,

<sup>2</sup> Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана,

<sup>3</sup> МГУ имени М. В. Ломоносова, Биологический факультет, Кафедра биоинженерии,

<sup>4</sup> Институт химической физики им. Н. Н. Семенова Российской академии наук

## Метод построения и кластерного анализа карт вероятности заселенности конформаций дипептидов

*Представлены динамические аналоги известных карт Рамачандрана, именуемые картами вероятности заселенности конформаций. Предложенные карты показывают вероятности реализации значений торсионных углов основной цепи полипептидов. Карты заселенности получены на основе предварительно определенных траекторий молекулярной динамики, а затем кластеризованы с использованием самоорганизующейся карты Кохонена. Представлен метод построения и кластерного анализа карт заселенности конформаций для всех возможных 400 дипептидов.*

**Ключевые слова:** дипептиды, конформационная динамика полипептидов, карта Рамачандрана, карта вероятности заселенности конформаций, кластерный анализ, самоорганизующаяся карта Кохонена

### Введение

Изучение пространственной структуры и структурной динамики полипептидов имеет большое значение для понимания их функционирования и разработки методов направленной модификации биологических функций этих макромолекул. Полипептиды являются гетерополимерами, состоящими из природных аминокислотных остатков, соединенных пептидными связями. Высокомолекулярные функционально активные полипептиды (белки) формируют уникальные пространственные структуры с образованием ионных, водородных, дисульфидных связей и с участием гидрофобных взаимодействий [1–3]. Пространственная структура полипептидов испытывает тепловые флуктуации с характерными временами от долей наносекунд и выше и амплитудами от 0,05 нм и более. Эти флуктуации пространственной структуры называются конформационной динамикой полипептидов и играют важную роль в функционировании биополимеров.

Основной вклад в конформационную динамику и пространственную структуру полипептидов вносят изменения двугранных (торсионных) углов при

поворотах аминокислотных остатков вокруг одинарных химических связей в полипептидной цепи. Выделяют типы торсионных углов  $\phi$ ,  $\psi$ ,  $\omega$  [3, 4]. С практической точки зрения угол  $\omega$  пептидной связи —CO—NH— не представляет интереса, поскольку поворот по этому углу связан с преодолением относительно высокого энергетического барьера, вследствие чего значение угла  $\omega$  обычно близко к  $180^\circ$  (реже к  $0^\circ$ ) [1].

Для изучения конформационной динамики биополимеров в настоящее время широко используют метод молекулярной динамики, основанный на численном решении систем уравнений механики макромолекул. Существует открытая база данных белков PDB (Protein Data Bank) [5], в которой содержится информация о примерно 120 000 белковых структур. Каждый белок в базе данных PDB имеет уникальный четырехзначный код.

Работа посвящена исследованию способов представления информации для кластерного анализа энергетических поверхностей *дипептидов*, которые являются первыми представителями в линейке всех возможных полипептидов. Предлагаем изучать и сравнивать динамические аналоги известных карт Рамачандрана — карты вероятности заселенности

конформаций, определяющие вероятности реализации значений пар торсионных углов  $\varphi$ ,  $\psi$  основной цепи полипептидов. Карты заселенности получаем на основе предварительно полученных траекторий молекулярной динамики (см., например, [6]), а затем кластеризуем с использованием самоорганизующейся карты Кохонена.

Известно 20 природных аминокислот, которые встречаются в различных сочетаниях в полипептидах. Эти аминокислоты принято обозначать трехбуквенным кодом (GLY, LYS, TYR и т. д.). Ставим задачу выполнить молекулярное моделирование и разработать методы автоматизации кластерного анализа карт заселенности конформаций для всех возможных 400 дипептидов.

## 1. Карты Рамачандрана и карты заселенности конформаций

Карта Рамачандрана (Сасисекхарана-Рамакришнана-Рамачандрана) представляет собой двумерную диаграмму возможных значений торсионных углов  $\varphi$ ,  $\psi$  аминокислотных остатков, входящих в структуру пептида. Карта предложена в 1963 г. Г. Н. Рамачандраном, С. Рамакришнаном, В. Сасисекхараном [7]. Каждую точку на карте определяют координаты, которые соответствуют углам  $\varphi$ ,  $\psi$  в отдельном аминокислотном остатке. Совокупность всех таких точек на карте позволяет качественно и количественно оценить наличие тех или иных элементов вторичных структур в белке.

Картами Рамачандрана удобно характеризовать распределение конформаций аминокислотных остатков в молекулах белков. На рис. 1 в качестве примера показана карта Рамачандрана для кристалли-

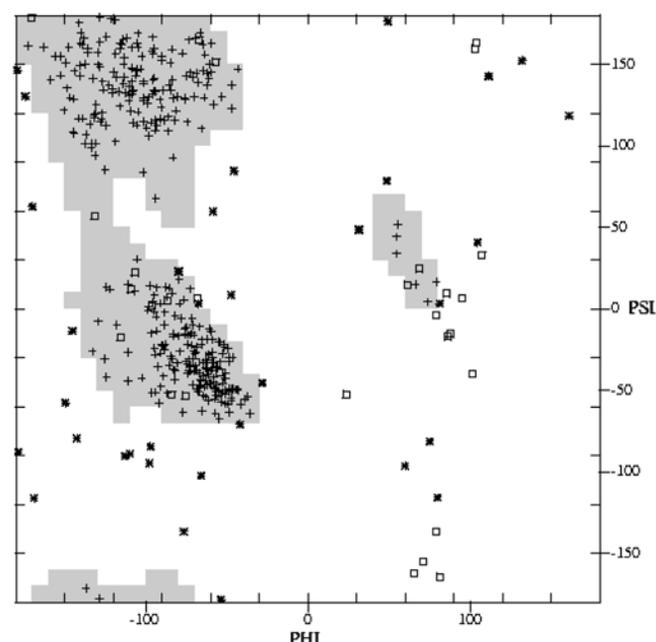


Рис. 1. Карта Рамачандрана для белка 1HMP [9]

ческой структуры одного из человеческих белков, имеющего код 1HMP в базе данных PDB. Точки на карте определенным образом сгруппированы, что позволяет судить о наличии в белке устойчивых вторичных структур. Точки, расположенные в пределах области, выделенной серым цветом, соответствуют энергетически выгодным конформациям — различным видам спиралей и листов [8]. Точки за пределами этой области соответствуют относительно небольшому числу энергетически напряженных конформаций.

Энергетическая (потенциальная) поверхность пептидной цепи представляет собой скалярную функцию от пространственных переменных, определяющих положение атомов этой цепи:

$$U(\mathbf{r}) = \Sigma U_{\text{связей}}(\mathbf{r}) + \Sigma U_{\text{другие}}(\mathbf{r}).$$

Здесь  $\mathbf{r}$  — вектор расстояний между атомами цепи;  $\Sigma U_{\text{связей}}(\mathbf{r})$  — потенциальная энергия химических связей;  $\Sigma U_{\text{другие}}(\mathbf{r})$  — потенциальная энергия невалентных взаимодействий [10].

Компонентами слагаемого  $\Sigma U_{\text{связей}}(\mathbf{r})$  являются следующие функции.

- Энергия химической связи, зависящая от расстояния между атомами и равная

$$U_b = k_b(r_{ij} - r_0)^2,$$

где  $k_b$  — коэффициент упругости (связь рассматривается как линейная пружина);  $r_{ij}$  — текущее расстояние между атомами;  $r_0$  — равновесная валентная длина.

- Энергия связи, зависящая от валентного угла и определяемая выражением

$$U_a = k_a(\theta - \theta_0)^2;$$

$$U_a = \frac{k_a}{2}(\cos(\theta) - \cos(\theta_0))^2,$$

где  $k_a$  — коэффициент упругости (связь рассматривается как пружина кручения);  $\theta$  — текущий валентный угол;  $\theta_0$  — равновесный валентный угол.

- Энергия связи, зависящая от торсионного угла  $\psi$

$$U_d = \begin{cases} k_d(1 + \cos(v\psi + \phi)), & v > 0, \\ k_d(\psi - \phi)^2, & v = 0. \end{cases}$$

Здесь  $k_d$  — коэффициент упругости (связь рассматривается как пружина кручения);  $v$  — кратность торсионного барьера;  $\psi$  — торсионный угол;  $\phi$  — угол сдвига фаз.

Компоненты невалентных взаимодействий  $\Sigma U_{\text{другие}}(\mathbf{r})$  обычно определяют потенциалы Леннард—Джонса (реже Борна—Хаггинса—Мейера, Букингема, Морса), кулоновские потенциалы [9].

Далее потенциальную энергию полипептида рассматриваем как функцию его торсионных углов в виде

$$U = U(\varphi_1, \dots, \varphi_n, \psi_1, \dots, \psi_n),$$

где  $n$  — число аминокислотных остатков в пептидной цепи.

На рис. 2 (см. вторую сторону обложки) изображена двумерная проекция энергетической поверхности одного из белков. Как правило, эта поверхность имеет один глобальный минимум, отвечающий наиболее энергетически выгодной конформации, а также некоторое число локальных минимумов. Прежде чем перейти в наиболее оптимальное по энергии состояние, белок в процессе молекулярной динамики проходит через некоторое число локально оптимальных состояний. Данный процесс называется сворачиванием (или фолдингом) белка.

Самый крупный из известных белков — титин состоит из 38 138 аминокислотных остатков. Отсюда следует, что энергетическая поверхность белка имеет очень высокую размерность, затрудняющую ее исследование.

## 2. Предлагаемая процедура получения карт заселенности конформаций для дипептидов

Суть процедуры получения карт заселенности конформаций заключается в том, что в качестве набора точек (см. рис. 1) мы используем набор пар углов  $\varphi, \psi$  для звеньев полипептидной цепи, определяемый по ее молекулярно-динамической траектории с некоторым шагом по времени. Каждую из точек карты окрашиваем в соответствии с вероятностью нахождения молекулы (дипептида) в этом состоянии (рис. 3, см. вторую сторону обложки).

Оранжевый цвет на рис. 3 показывает, в каком состоянии дипептид может находиться с наибольшей вероятностью, синий — с наименьшей вероятностью. Белые участки соответствуют конформациям, реализация которых практически невозможна. Указанные вероятности пропорциональны числу точек молекулярно-динамической траектории дипептида, попавших в соответствующие подобласти пространства конформаций. Таким образом, карта заселенности конформаций дает наглядное представление о конформационной структуре дипептида в пространствах углов  $\varphi, \psi$  одного или нескольких аминокислотных остатков. Благодаря тому, что вероятность нахождения белка в том или ином состоянии связана с потенциальной энергией этого состояния, такая диаграмма также дает наглядное представление о том, какие состояния белка являются наиболее или наименее энергетически выгодными.

Автоматизированная процедура построения карт заселенности конформаций дипептида включает следующие шаги:

- формирование пространственной молекулярной структуры дипептида по заданным кодам его аминокислот;
- запуск программы молекулярной динамики для сформированной пространственной структуры дипептида и сбор данных о значениях углов  $\varphi, \psi$

на каждом временном шаге для каждой аминокислоты, входящей в дипептид;

- оценка двумерных плотностей вероятности  $f_1(\varphi, \psi), f_2(\varphi, \psi)$  нахождения дипептида в заданной точке конформационного пространства для первой и второй аминокислот соответственно;
- визуализация карт заселенности конформаций для каждой аминокислоты, входящей в дипептид, на основе полученных на предыдущем шаге двумерных плотностей вероятности.

Для последующего решения задачи кластеризации карт заселенности необходимо учесть, что ландшафт энергетической поверхности дипептида характеризуется одновременно двумя его аминокислотными остатками и, значит, двумя картами заселенности. Из этого следует, что кластеризацию необходимо осуществлять по объединенному набору дискретных функций плотности вероятности  $\tilde{f}_1(\varphi, \psi), \tilde{f}_2(\varphi, \psi)$ , который представляем в виде вектора  $X(j)$ , где  $j$  — номер соответствующей ячейки сетки, покрывающей область допустимых значений углов  $\varphi, \psi$ .

## 3. Постановка задачи кластеризации и используемые алгоритмы кластеризации

Рассматриваем задачу кластеризации в следующей постановке. Полагаем, что объект  $X \in R^m$  набора  $\mathbf{X}$  имеет набор характеристик  $(x_1, \dots, x_m)$ . Определена функция расстояния между объектами (метрика)

$$\rho(X_i, X_j) \rightarrow [0; \infty), X_i, X_j \in \mathbf{X}.$$

Задано число кластеров  $k$ .

Требуется найти разбиение множества объектов  $\mathbf{X}$  на кластеры

$$C = \{C_1, \dots, C_k\},$$

такое, что каждый объект  $X_i \in \mathbf{X}$  принадлежит одному и только одному кластеру.

Задачу кластеризации ставим как задачу минимизации средней квадратичной ошибки разбиения

$$e^2(\mathbf{X}, C) = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} \|X_{ij} - \mathbf{X}_j^C\|^2, \quad (1)$$

где  $\mathbf{X}_j^C$  — вектор координат центра масс кластера  $C_j$ ;

$n_j$  — число объектов в этом кластере;  $\sum_{j=1}^k n_j = n$  —

число объектов в наборе  $\mathbf{X}$ .

Вообще говоря, в качестве метрики  $\rho$  могут быть использованы степенное расстояние, евклидово и квадрат евклидова расстояний, манхэттенское расстояние, расстояние Чебышева [12]. Мы используем евклидово расстояние.

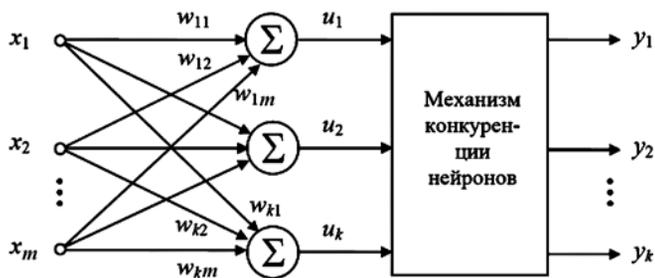


Рис. 4. Схема соединения нейронов типа WTA [13]

Структура нейронной сети WTA [13, 14] представлена на рис. 4. Все нейроны сети получают на вход один и тот же входной сигнал  $x_1, \dots, x_m$ . На основе анализа их выходных сигналов  $u_i, i = 1, 2, \dots, k$ , проводится выбор нейрона-победителя как нейрона, имеющего наибольшее значение  $u_i$ . Победителю ставят в соответствие сигнал  $y_i = 1$ , а всем другим проигравшим нейронам — нулевой сигнал  $y_i = 0$ .

С точки зрения реализации, нейрон  $\Sigma_i$  представляет собой сумматор, на который подается линейная комбинация компонентов вектора входных сигналов  $\mathbf{X}$  и вектора весов его синаптических связей  $\mathbf{W}_i$ :

$$u_i = (\mathbf{W}_i, \mathbf{X}) = w_{i1}x_1 + \dots + w_{im}x_m, i = 1, 2, \dots, k.$$

Начальные значения синаптических весовых коэффициентов генерируем случайными, равномерно распределенными в интервале  $[0; 1]$ . Векторы входных данных нормализуем с целью избежать лишних шагов обучения и решить, хотя бы частично, проблему "мертвых" нейронов [12].

Наиболее простым методом обучения нейронной сети WTA является правило Гроссберга [15]. В каждом цикле обучения  $t$  в этом методе побеждает тот нейрон, чей текущий вектор входных весов  $\mathbf{W}_i^t$  наиболее близок текущему входному вектору  $\mathbf{X}^t$ . При этом вектор  $\mathbf{W}_i^t$  корректируют в сторону вектора  $\mathbf{X}^t$ . Поэтому в результате обучения каждая группа близких друг другу входных векторов (кластер) начинает обрабатываться одним нейроном.

В настоящей работе использован алгоритм обучения Кохонена [12—14]. В отличие от метода обучения Гроссберга этот алгоритм позволяет корректировать веса не только нейронов-победителей, но и их ближайших соседей (в смысле используемой топологии нейронной сети). Говоря более точно, веса корректируются у всех нейронов, но с ростом расстояния данного нейрона до нейрона-победителя сила коррекции слабеет.

В качестве функции соседства используем функцию Гаусса

$$G^t(i, X^t) = \exp\left(-\frac{d^2(W_i^t, X^t)}{2(\sigma^t)^2}\right),$$

где  $d^2(W_i^t, X^t)$  — расстояние от  $i$ -го нейрона до нейрона-победителя в  $t$ -м цикле обучения;  $\sigma^t$  — ширина функции Гаусса на этом цикле обучения. Полагаем, что  $d^2(W_i^t, X^t) = 0$  для нейрона-победителя;  $d^2(W_i^t, X^t) = 1$  — для всех его ближайших соседей;  $d^2(W_i^t, X^t) = 2$  — для соседей второго уровня и т. д.

Ширину функции Гаусса  $\sigma$  уменьшаем в ходе обучения по правилу

$$\sigma^t = \sigma^{\max} \left( \frac{\sigma^{\min}}{\sigma^{\max}} \right)^{\frac{t}{t^{\max}}},$$

где  $\sigma^{\max}, \sigma^{\min}$  — соответственно максимальное и минимальное значение величины  $\sigma$ ;  $t^{\max}$  — число итераций обучения.

Коррекцию весов  $i$ -го нейрона сети WTA осуществляем по формуле

$$W_i^{t+1} = W_i^t + \eta_i^t G^t(W_i^t, X^t)(X^t - W_i^t), i \in [1:k],$$

где  $\eta_i^t$  — коэффициент обучения  $i$ -го нейрона на  $t$ -м цикле обучения. Значения этих коэффициентов в процессе обучения уменьшаем по правилу

$$\eta_i^t = \eta^{\max} \left( \frac{\eta^{\min}}{\eta^{\max}} \right)^{\frac{t}{t^{\max}}},$$

где  $\eta^{\max}, \eta^{\min}$  — максимальное и минимальное значения этого коэффициента соответственно.

#### 4. Программная реализация

Разработка программного комплекса для кластеризации конформационных карт дипептидов, названного DPPMClusterizer (Dipeptide Probability Population Map Clusterizer), выполнена на языке C, в силу его универсальности, кроссплатформенности и высокой производительности. Программирование утилит и вспомогательных инструментов, обеспечивающих конвертацию данных и сопряжение интерфейсов основных программ, осуществлено на языке программирования Python и языке скриптов GNU Bourne-Again Shell (bash). Для компиляции использовался набор компиляторов GCC 4.9.0 (GNU Compiler Collection) и интерпретаторов GNU Python 2.7.7 и GNU bash 4.3.

Моделирование динамики дипептидов реализовано с помощью программного пакета молекулярной динамики NAMD [16].

- Использованы следующие сторонние библиотеки:
- *GNU SciPy 0.14.0* — универсальная научная библиотека языка *Python* для сравнительного анализа алгоритмов кластеризации;
  - *GNU Matplotlib 1.3.1* — библиотека визуализации научных данных для языка *Python* и библиотеки *SciPy*.

Для графического вывода результатов работы программы использована утилита *Gnuplot 4.6*. Разработка велась в среде операционной системы *Linux* дистрибутива *Novell OpenSuse 13.1*.

Все перечисленное выше программное обеспечение является свободным и распространяется под лицензией *GPL (GNU Public License)*.

Ниже представлены основные блоки программной модели.

**Сборка дипептидов.** Данный блок осуществляет последовательную сборку всех вариантов дипептидов из набора 20 аминокислот. Разработаны сценарии, осуществляющие сборку исследуемого дипептида в три этапа:

- 1) создание конфигурационного файла для сборки;
- 2) сборка атомистической структуры дипептида по аминокислотной последовательности;
- 3) генерация структурного файла дипептида на основе файла атомистической структуры.

**Запуск пакета молекулярной динамики *NAMD*.** Для запуска этого пакета требуется наличие следующих данных:

- файл атомистической структуры дипептида в формате *PDB (Protein Data Bank)*, содержащий координаты атомов [17]. Файлы *PDB* могут быть созданы вручную, либо загружены из открытого банка данных белковых структур;
- файл белковой структуры в формате *PSF (Protein Structure File)*, который содержит информацию о взаимодействии ковалентно-связанных атомов;
- файл параметров силового поля, содержащий данные для вычисления потенциалов сил, действующих на атомы системы [18];
- конфигурационный файл, в котором пользователь задает параметры для запуска процесса молекулярной динамики.

**Построение 2D-гистограммы вероятностей заселенности конформаций.** Блок реализует следующие функции:

- анализ результатов моделирования молекулярной динамики и формирование текстового файла, содержащего соответствующие 2D-гистограммы;
- отображение гистограммы в графическом виде как карты заселенности конформаций.

**Визуализация карт заселенности конформаций** — создания набора изображений для обработки алгоритмами кластеризации.

**Кластеризация методом *WTA*.** Блок выполняет кластеризацию полученных карт заселенности по

методу *WTA* с применением алгоритма обучения Кохонена.

## 5. Вычислительный эксперимент

Цель вычислительного эксперимента состояла в построении для всех возможных дипептидов карт конформационной заселенности в пространстве углов  $\phi$ ,  $\psi$ , отображающих вероятностное распределение состояний дипептида. Время моделирования методом молекулярной динамики принято равным 10 нс, шаг моделирования — 1 фс. Динамику молекул моделируем в вакууме без водного окружения при температуре, равной 300 К. Используем модель силового поля *CHARMM* версии 2.7 [19].

С помощью разработанного программного обеспечения выполнен анализ 400 пар  $\phi$ ,  $\psi$ -карт вероятности заселенности конформаций дипептидов.

Поскольку число кластеров на изображениях априори неизвестно, одной из задач исследования являлся поиск минимально достаточного числа кластеров. Если расстояние между центром кластера и ближайшим к нему дипептидом превышало заданное значение, то программный комплекс *DPPMClusterizer* повторял кластеризацию заданное число раз. В случае отсутствия успеха число кластеров увеличивалось. Кроме того, комплекс *DPPMClusterizer* для каждого кластера вычислял максимальное расстояние между его представителями (т. е. радиус кластера). Если, хотя бы для одного из текущих кластеров, это значение превышало заданное значение, то кластеризация повторялась с числом кластеров, увеличенным на единицу. Дипептиды, расстояние от которых до типичного представителя данного кластера превышало некоторый установленный пользователем порог, помечались как требующие визуальной проверки (желтый цвет). Аналогично дипептиды за пределами второго порога помечались, как, вероятнее всего, не относящиеся к данному кластеру (красный цвет). Таким образом, существенно упростился экспертный анализ данных, полученных в результате вычислительного эксперимента.

Примеры полученных кластеров показаны на рис. 5 (см. третью сторону обложки) и рис. 6 (см. четвертую сторону обложки). Полученные кластеры также позволяют построить таблицы возможных аминокислотных замен. Эти таблицы могут быть визуализированы в виде графов связности, где ребро между пептидами соответствует возможной замене, а цвет — близости дипептидов.

## Заключение

В работе предложен способ построения карт заселенности конформаций дипептидов с помощью разработанного программного комплекса *DPPMClusterizer*, а также метод кластерного анализа полученных изображений. По результатам ра-

боты создан атлас дипептидов, содержащий карты заселенности для всех возможных пар дипептидов с указанием их схожести. Полученный результат представляет интерес с точки зрения биофизики в контексте исследования пространственной структуры белков.

Развитие работы предполагает анализ более сложных пептидов, состоящих из трех и более аминокислот. При этом увеличение числа звеньев приведет к увеличению числа степеней свободы, а значит и размерности карт заселенности конформаций, а также к увеличению числа получаемых карт. Данное обстоятельство делает целесообразным разработку алгоритмов "свертки" многомерных изображений, а также численных мер их близости. В конечном счете при значительном увеличении размерности задачи может потребоваться принципиально иной подход к ее решению, основанный на новых методах анализа и визуализации многомерных данных.

*Работа выполнена при частичной поддержке гранта Российского научного фонда № 14-50-00029 и гранта РФФИ № 16-07-00287.*

#### Список литературы

1. Северин Е. С. Биохимия: учебник для вузов. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2003. 779 с.
2. Первичная структура белков — аминокислоты: Лекция 1: URL: <http://hpc.mipt.ru/wp-content/uploads/2012/05/Lecture01.pdf> (дата обращения: 11.05.2017).
3. Финкельштейн А. В. Введение в физику белка. Курс лекций: URL: [http://phys.protres.ru/lectures/protein\\_physics/](http://phys.protres.ru/lectures/protein_physics/) (дата обращения: 11.05.2017).
4. Пименова И. Н., Пименов А. В. Лекции по общей биологии. М.: Лицей, 2003. 215 с.
5. RCSB Protein Data Bank. URL: <http://www.rcsb.org/pdb/> (дата обращения: 10.05.2017).
6. Шайтан К. В., Ермолаева М. Д., Сарайкин С. С. Молекулярная динамика олигопептидов 3 // Биофизика, 1999. Т. 44. С. 18–21.
7. Ramachandran G. N., Ramakrishnan C., Sasisekharan V. Stereochemistry of polypeptide chain configurations // *Journal of Molecular Biology*. 1963. N. 7. P. 95–103.
8. Вторичные структуры белков [Электронный ресурс]. URL: <http://www.chem.msu.ru/rus/teaching/kolman/74.htm> (дата обращения: 10.05.2017).
9. Generating Ramachandran (phi/psi) plots for Proteins [Электронный ресурс]. URL: [http://www2.warwick.ac.uk/fac/sci/moac/people/students/peter\\_cock/python/ramachandran/other/](http://www2.warwick.ac.uk/fac/sci/moac/people/students/peter_cock/python/ramachandran/other/) (дата обращения: 11.05.2017).
10. Шайтан К. В., Балабаев Н. К. Алгоритмы и методы молекулярной динамики. М., 2010. 166 с.
11. Protein Folding and Denaturation. URL: [http://www1.lsbu.ac.uk/water/protein\\_denatured.html](http://www1.lsbu.ac.uk/water/protein_denatured.html) (дата обращения: 11.05.2017).
12. Котов А., Красильников Н. Семинары: Кластеризация данных. URL: <http://logic.pdmi.ras.ru/> (дата обращения: 11.05.2017).
13. Федорук В. Г. Искусственные нейронные сети. URL: <http://bigor.bmstu.ru/?cnt/?doc=NN/base.cou> (дата обращения: 11.05.2017).
14. Грошев С. В., Смольникова Е. А. Обзор подходов к визуализации многомерных данных // Технологии инженерных и информационных систем. 2015. № 3. С. 3–13.
15. Инстар Гроссберга. URL: <http://bigor.bmstu.ru/?cnt/?doc=NN/013-neurons.mod/?cou=NN/base.cou> (дата обращения: 11.05.2017).
16. NAMD — Scalable Molecular Dynamics. URL: <https://www.ks.uiuc.edu/Research/namd> (дата обращения: 11.05.2017).
17. PDB File Format. URL: <https://www.rcsb.org/pdb/static/pdb> (дата обращения: 11.05.2017).
18. NAMD Input and Output types. URL: <http://www.ks.uiuc.edu/Research/namd/2.9/ug/node10.html> (дата обращения: 11.05.2017).
19. The CHARMM Force Field. URL: <https://www.ks.uiuc.edu/science/node5> (дата обращения: 11.05.2017).

I. V. Basov<sup>1</sup>, Student, e-mail: [generalrot@rambler.ru](mailto:generalrot@rambler.ru),

S. V. Groshev<sup>2</sup>, Senior Lecturer, e-mail: [groshev\\_sergey@mail.ru](mailto:groshev_sergey@mail.ru),

A. P. Karpenko<sup>2</sup>, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Head of the Department, e-mail: [apkarpenko@mail.ru](mailto:apkarpenko@mail.ru),

K. V. Shaitan<sup>3</sup>, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., e-mail: [shaitan49@yandex.ru](mailto:shaitan49@yandex.ru),

D. L. Shurov<sup>4</sup>, Graduate student, e-mail: [d.l.shurov@gmail.com](mailto:d.l.shurov@gmail.com),

Moscow, <sup>1</sup>Moscow Institute of State and Municipal Administration,

<sup>2</sup>Bauman Moscow State Technical University,

<sup>3</sup>Lomonosov Moscow State University, Faculty of Biology, Department of Bioengineering,

<sup>4</sup>Semenov Institute of Chemical Physics of Russian Academy of Sciences

## Method for Construction and Cluster Analysis of Conformational Occupancy Density Maps of Dipeptides

*We propose dynamic analogues of known Ramachandran plots, called conformational occupancy density maps. The proposed maps show the probability of values of the torsion angles of the main polypeptide chain. Maps are obtained based on molecular dynamics trajectories, and then are clustered using self-organizing maps. We present a method for constructing and cluster analysis of conformational occupancy density maps for all possible 400 dipeptides.*

**Keywords:** dipeptides, conformational dynamics of dipeptides, Ramachandran plot, conformational occupancy density map, cluster analysis, self-organizing map

## References

1. **Severin E. S.** *Biokhimiya: uchebnik dlya vuzov*, Moscow, GE-OTAR-Media, 2003, 779 p. (in Russian).
2. **Pervichnaya struktura belkov — aminokisloty**, Lektsiya 1, URL: <http://hpc.mipt.ru/wp-content/uploads/2012/05/Lecture01.pdf> (data of access: 11.05.2017) (in Russian).
3. **Finkel'shtein A. V.** *Kurs lektsii: Vvedenie v fiziku belka*, URL: [http://phys.protres.ru/lectures/protein\\_physics/](http://phys.protres.ru/lectures/protein_physics/) (data of access: 11.05.2017) (in Russian).
4. **Pimenova I. N., Pimenov A. V.** *Lektsii po obshchei biologii*, Moscow, Litsei, 2003, 215 p. (in Russian).
5. **RCSB Protein Data Bank**. URL: <http://www.rcsb.org/pdb/> (data of access: 10.05.2017).
6. **Shaitan K. V., Ermolaeva M. D., Saraikin S. S.** Molekulyarnaya dinamika oligopeptidov 3, *Biofizika*, 1999, vol. 44, pp. 18–21. (in Russian).
7. **Ramachandran G. N., Ramakrishnan C., Sasisekharan V.** Stereochemistry of polypeptide chain configurations, *Journal of Molecular Biology*, 1963, no. 7: 95–103.
8. **Vtorichnye struktury belkov**, URL: <http://www.chem.msu.ru/rus/teaching/kolman/74.htm> (data of access: 10.05.2017) (in Russian).
9. **Generating Ramachandran (phi/psi) plots for Proteins**, URL: [http://www2.warwick.ac.uk/fac/sci/moac/people/students/peter\\_cock/python/ramachandran/other/](http://www2.warwick.ac.uk/fac/sci/moac/people/students/peter_cock/python/ramachandran/other/) (data of access: 11.05.2017).
10. **Shaitan K. V., Balabaev N. K.** *Algoritmy i metody molekulyarnoi dinamiki*, Moscow, 2010, 166 p. (in Russian).
11. **Protein Folding and Denaturation**, URL: [http://www1.lsbu.ac.uk/water/protein\\_denatured.html](http://www1.lsbu.ac.uk/water/protein_denatured.html) (data of access: 11.05.2017).
12. **Kotov A., Krasil'nikov N.** Seminary: *Klasterizatsiya dannykh*, URL: <http://logic.pdmi.ras.ru/> (data of access: 11.05.2017) (in Russian).
13. **Fedoruk V. G.** *Iskusstvennye neironnye seti*, URL: <http://bigor.bmstu.ru/?cnt/?doc=NN/base.cou> (data of access: 11.05.2017) (in Russian).
14. **Groshev S. V., Smol'nikova E. A.** Obzor podkhodov k vizualizatsii mnogomernykh dannykh, *Tekhnologii inzhenernykh i informatsionnykh sistem*, 2015, no. 3, pp. 3–13 (in Russian).
15. **Instar Grossberga**. URL: <http://bigor.bmstu.ru/?cnt/?doc=NN/013-neurons.mod/?cou=NN/base.cou> (data of access: 11.05.2017) (in Russian).
16. **NAMD — Scalable Molecular Dynamics**, URL: <https://www.ks.uiuc.edu/Research/namd> (data of access: 11.05.2017).
17. **PDB File Format**, URL: <https://www.rcsb.org/pdb/static/pdb> (data of access: 11.05.2017).
18. **NAMD Input and Output types**, URL: <http://www.ks.uiuc.edu/Research/namd/2.9/ug/node10.html> (data of access: 11.05.2017).
19. **The CHARMM Force Field**, URL: <https://www.ks.uiuc.edu/science/node5> (data of access: 11.05.2017).

---

---

### Адрес редакции:

107076, Москва, Стромынский пер., 4

Телефон редакции журнала (499) 269-5510

E-mail: [it@novtex.ru](mailto:it@novtex.ru)

Технический редактор *Е. В. Конова*.

Корректор *Е. В. Комиссарова*.

Сдано в набор 10.07.2017. Подписано в печать 23.08.2017. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 8,86. Заказ IT917. 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.

Оригинал-макет ООО "Авансед солюшнз". Отпечатано в ООО "Авансед солюшнз".

119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1.

---