

ISSN 1684–8853

ИНФОРМАЦИОННО- УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

3(76)/2015

3(76)/2015

REFEREED EDITION

INFORMATSIONNO- UPRAVLIAIUSHCHIE SISTEMY (INFORMATION AND CONTROL SYSTEMS)

Founder

«Information and Control Systems», Ltd.

PublisherSaint-Petersburg State University
of Aerospace Instrumentation**Editor-in-Chief**M. Sergeev
Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia**Deputy Editor-in-Chief**E. Krouk
Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia**Executive secretary**

O. Muravtsova

Editorial CouncilC. Christodoulou
PhD, Professor, Albuquerque, New Mexico, USAL. Chubraeva
RAS Corr. Member, Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

L. Fortuna

PhD, Professor, Catania, Italy

A. Fradkov

Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

V. Kozlov

Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

B. Meyer

Dr. Sc., Professor, Zurich, Switzerland

A. Ovodenko

Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

Y. Podoplyokin

Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

Yu. Shokin

RAS Academician, Dr. Sc., Phys.-Math., Novosibirsk, Russia

V. Simakov

Dr. Sc., Tech., Professor, Moscow, Russia

V. Vasilev

RAS Corr. Member, Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

R. Yusupov

RAS Corr. Member, Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

Editorial Board

V. Anisimov

Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

B. Bezruchko

Dr. Sc., Phys.-Math., Saratov, Russia

N. Blaunstein

Dr. Sc., Phys.-Math., Professor, Beer-Sheva, Israel

A. Dudin

Dr. Sc., Tech., Professor, Minsk, Belarus

I. Dumer

PhD., Professor, Riverside, USA

V. Khimenko

Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

G. Maltsev

Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

V. Melekhin

Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

A. Shalyto

Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

A. Shepeta

Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

A. Smirnov

Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

Z. Yuldashev

Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

A. Zeifman

Dr. Sc., Phys.-Math., Vologda, Russia

Editor: A. Larionova**Proofreader:** T. Zvertanovskaia**Design:** N. Karavaeva, M. Chernenko**Layout and composition:** N. Karavaeva**Contact information**The Editorial and Publishing Center, SUAI
67, B. Morskaia, 190000, St. Petersburg, Russia
Website: <http://i-us.ru/en>, E-mail: ius.spb@gmail.com
Tel.: +7 - 812 494 70 02**THEORETICAL AND APPLIED MATHEMATICS**

- Balonin N. A., Djokovic D. Z.** Symmetry of Two-Circulant Hadamard Matrices and Periodic Golay Pairs 2
- Vasilyev N. N., Duzhin V. S.** Building Irreducible Representations of a Symmetric Group $S(n)$ with Large and Maximum Dimensions 17
- Krepkiy I. A.** Relation between the Sandpile Group of a Graph and its Matroid 23

INFORMATION PROCESSING AND CONTROL

- Kuznetsov V. A.** Image Segmentation Technique for Photometric Stereo 29

INFORMATION AND CONTROL SYSTEMS

- Fridman A. Ya.** Control of Combined Inference in Discrete Intelligence Systems 35

SYSTEM AND PROCESS MODELING

- Gorodetskiy A. E., Tarasova I. L., Kurbanov V. G., Agapov V. A.** Mathematical Model of Automatic Control System for SEMS Module 40
- Tsybulnik A. N., Leshko N. A.** Adaptive Reception of FM Signals with Unknown Modulation Pattern 46

HARDWARE AND SOFTWARE RESOURCES

- Kotlikov E. N., Novikova Yu. A., Kovalenko I. I.** Film Manager Software for Synthesis and Analysis of Interference Coatings 51

INFORMATION SECURITY

- Kotenko I. V., Doynikova E. V.** Countermeasure Selection in Security Management Systems 60
- Volkhonskiy V. V., Malyshev S. L.** Analysis of Intruder Detection Efficiency in Physical Protection Systems 70

INFORMATION CHANNELS AND MEDIUM

- Ben-Shimol Y., Kitrosera I.** An Efficient Cross-Layer Aware Mapping of VoIP Calls in Wireless OFDMA Systems. Part II: Mapping Algorithms and their Performance 77
- Kul'minskii D. D., Ponomarenko V. I., Karavaev A. S., Prokhorov M. D.** Communication System Based on Synchronization of Time-Delay Systems with Switching of Chaotic Regimes 85
- Tatarnikova T. M.** Structural Synthesis of an Interface Center for Corporate Networks 92
- Skakov E. S., Malyshev V. N.** Multi-Start and Tabu Search Algorithms in Base Station Location Problem 99

CONTROL IN MEDICAL AND BIOLOGICAL SYSTEMS

- Simana E., Simian R., Portnoy S., Jaffe A., Dekel B. Z.** Feasibility Study – Vitamin D Loading Determination by Ftir-Atr 107

CONTROL IN SOCIAL AND ECONOMIC SYSTEMS

- Peshkova G. U.** Conceptual Approaches to forming Local Mining Industry Development Strategy 112

BRIEF SCIENTIFIC REPORTS

- Eremis S. V.** Decision-Making Algorithm for Regional Aviation and Aircraft Design in Krasnoyarsk Krai 117

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

- 121

3(76)/2015

РЕЦЕНЗИРУЕМОЕ ИЗДАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННО-
УПРАВЛЯЮЩИЕ
СИСТЕМЫУчредитель
ООО «Информационно-управляющие системы»Издатель
Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроенияГлавный редактор
М. Б. Сергеев,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФЗам. главного редактора
Е. А. Крук,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФОтветственный секретарь
О. В. Муравцова

Редакционный совет:

Председатель А. А. Оводенко,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
В. Н. Васильев,
чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
В. Н. Козлов,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФК. Кривошолу,
д-р наук, проф., Альбукерке, Нью-Мексико, США
Б. Мейер,
д-р наук, проф., Цюрих, ШвейцарияЮ. Ф. Подоплёкин,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
В. В. Симаков,
д-р техн. наук, проф., Москва, РФЛ. Фортун,
д-р наук, проф., Катания, ИталияА. Л. Фрадков,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
Л. И. Чубраева,
чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, С.-Петербург, РФЮ. И. Шокин,
акад. РАН, д-р физ.-мат. наук, проф., Новосибирск, РФ
Р. М. Юсупов,
чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

Редакционная коллегия:

В. Г. Анисимов,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
Б. П. Безручко,
д-р физ.-мат. наук, проф., Саратов, РФН. Блаунштейн,
д-р физ.-мат. наук, проф., Беэр-Шева, Израиль
А. Н. Дудин,
д-р физ.-мат. наук, проф., Минск, БеларусьИ. И. Думер,
д-р наук, проф., Риверсайд, США
А. И. Зейфман,
д-р физ.-мат. наук, проф., Вологда, РФГ. Н. Мальцев,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
В. Ф. Мелехин,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФА. В. Смирнов,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
В. И. Хименко,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФА. А. Шальто,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
А. П. Шепета,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФЗ. М. Юлдашев,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФРедактор: А. Г. Ларионова
Корректор: Т. В. Звертановская
Дизайн: Н. Н. Караева, М. Л. Черненко
Компьютерная верстка: Н. Н. КараеваАдрес редакции: 190000, Санкт-Петербург,
Б. Морская ул., д. 67, ГУАП, РИЦ
Тел.: (812) 494-70-02, e-mail: ius.spb@gmail.com, сайт: http://i-us.ru
Журнал зарегистрирован в Министерстве РФ по делам печати,
телерадиовещания и средств массовых коммуникаций.
Свидетельство о регистрации ПИ № 77-12412 от 19 апреля 2002 г.
Перерегистрирован в Роскомнадзоре.
Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-49181 от 30 марта 2012 г.Журнал входит в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий,
в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации
на соискание ученой степени доктора и кандидата наук».
© Коллектив авторов, 2015

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ МАТЕМАТИКА

Балонин Н. А., Джокович Д. Ж. Симметрия двуциклических матриц Адамара и периодические пары Голея 2**Васильев Н. Н., Дужин В. С.** Построение неприводимых представлений симметрической группы $S(n)$ с большими и максимальными размерностями 17**Крепкий И. А.** Зависимость между песочной группой графа и его матроидом 23

ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И УПРАВЛЕНИЕ

Кузнецов В. А. Сегментация исходных снимков для фотометрического метода трехмерного сканирования 29

ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

Фридман А. Я. Управление комбинированным выводом в дискретных интеллектуальных системах 35

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ

Городецкий А. Е., Тарасова И. Л., Курбанов В. Г., Агапов В. А. Математическая модель системы автоматического управления модуля SEMS 40**Цыбульник А. Н., Лешко Н. А.** Адаптивный прием частотно-модулированных сигналов с неизвестным законом модуляции 46

ПРОГРАММНЫЕ И АППАРАТНЫЕ СРЕДСТВА

Котликов Е. Н., Новикова Ю. А., Коваленко И. И. Программа синтеза и анализа интерференционных покрытий Film Manager 51

ЗАЩИТА ИНФОРМАЦИИ

Котенко И. В., Дойникова Е. В. Методика выбора контрмер в системах управления информацией и событиями безопасности 60**Волхонский В. В., Малышкин С. Л.** Методика анализа эффективности обнаружения нарушителя средствами систем физической защиты 70

ИНФОРМАЦИОННЫЕ КАНАЛЫ И СРЕДЫ

Ben-Shimol Yehuda, Kitroser Itzik. An Efficient Cross-Layer Aware Mapping of VoIP Calls in Wireless OFDMA Systems. Part II: Mapping Algorithms and their Performance 77**Кульминский Д. Д., Пономаренко В. И., Караваев А. С., Прохоров М. Д.** Система связи, основанная на синхронизации систем с задержкой с переключением хаотических режимов 85**Татарникова Т. М.** Структурный синтез центра сопряжения корпоративных сетей 92**Скаков Е. С., Малыш В. Н.** Использование алгоритмов мультистарта и поиска с запретами для решения задачи размещения базовых станций 99

УПРАВЛЕНИЕ В МЕДИЦИНЕ И БИОЛОГИИ

Simana E., Simian R., Portnoy S., Jaffe A., Dekel B. Z. Feasibility Study – Vitamin D Loading Determination by Ftir-Atr 107

УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Пешкова Г. Ю. Концептуальные подходы к формированию стратегии развития горнопромышленного комплекса местного значения 112

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Еремин С. В. Об алгоритме принятия решений: от архитектуры региональной авиасети к опциональности самолетов (на примере Красноярского края) 117

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

121

Сдано в набор 05.05.15. Подписано в печать 26.06.15. Формат 60×84/16.
Бумага офсетная. Гарнитура SchoolBookC. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 14,7. Уч.-изд. л. 18,4. Тираж 1000 экз. Заказ 209.Оригинал-макет изготовлен в редакционно-издательском центре ГУАП.
190000, Санкт-Петербург, Б. Морская ул., 67.Отпечатано с готовых диапозитивов в редакционно-издательском центре ГУАП.
190000, Санкт-Петербург, Б. Морская ул., 67.Журнал распространяется по подписке. Подписку можно оформить
через редакцию, а также в любом отделении связи по каталогу «Роспечать»:
№ 48060 — годовой индекс, № 15385 — полугодовой индекс.

СИММЕТРИЯ ДВУЦИКЛИЧЕСКИХ МАТРИЦ АДАМАРА И ПЕРИОДИЧЕСКИЕ ПАРЫ ГОЛЕЯ

Н. А. Балонин^а, доктор техн. наук, профессор

Д. Ж. Джокович^б, доктор мат. наук, профессор

^аСанкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, РФ

^бУниверситет Ватерлоо, Ватерлоо, Онтарио, Канада

Цель: изучить конструкцию двуциклических матриц Адамара, систематически исследовать роль симметрии и кососимметрии циклических блоков этой конструкции, классифицировать периодические пары Голея, вплоть до длины 40, тесно связанные с двуциклическими матрицами Адамара. **Методы:** вычислительные методы линейной алгебры, рекуррентные методы поиска оптимума, методы нахождения периодических пар Голея фиксированных размеров с использованием высокопроизводительных компьютеров. **Результаты:** рассмотрена проблема построения матриц Адамара двуциклического типа введением специальных мер симметрии (индекса симметрии, дефектов симметрии и кососимметрии), исследованы классы эквивалентности периодических пар Голея небольшой длины. Аналог гипотезы Райзера о несуществовании циклических матриц Адамара порядка больше, чем четыре, был предложен ранее первым автором. Его содержание состоит в утверждении того, что не существует симметричных двуциклических матриц Адамара порядка выше 32. Последняя гипотеза проверена в нескольких случаях с использованием компьютера. Каталог представителей классов эквивалентности двуциклических матриц Адамара представлен в форме списка периодических пар Голея длин вплоть до размера 26 (включительно). Приведены примеры почти симметричных двуциклических матриц Адамара относительно больших порядков. **Практическая значимость:** матрицы Адамара имеют непосредственное практическое значение для задач помехоустойчивого кодирования, сжатия и маскирования видеoinформации. Программное обеспечение нахождения двуциклических матриц Адамара и библиотека периодических пар Голея вместе с исполняемыми *on line* алгоритмами доступны в математической сети Интернет <http://mathscinet.ru>.

Ключевые слова — ортогональные матрицы, матрицы Адамара, гипотеза Райзера, циклические матрицы, двуциклические матрицы, периодические пары Голея.

Введение

Настоящая работа посвящена исследованию свойств двуциклических матриц Адамара, в частности симметрии.

Напомним, что матрица Адамара — квадратная матрица \mathbf{H} порядка n , состоящая из чисел $\{1, -1\}$, столбцы (или строки) которой ортогональны:

$$\mathbf{H}^T \mathbf{H} = \mathbf{H} \mathbf{H}^T = n \mathbf{I}, \quad (1)$$

где \mathbf{I} — единичная матрица. Определение ввел Адамар [1], отметив экстремальное качество получаемых из этого квадратичного уравнения решений (матрицы имеют максимально возможный детерминант на классе матриц с элементами по модулю, не большими 1), а также возможную область существования: порядки $n = 4k$, k — целое.

До появления численных методов детерминант занимал внимание математиков как элемент теории решения линейных алгебраических уравнений.

Для Сильвестра [2], открывшего первую последовательность таких матриц порядков $n = 2^t$, t — целое, существенно было именно то, что ортогональные матрицы инвертируются особенно просто. Адамар как геометр (он автор учебника геометрии) интересовался геометрической интерпретацией детерминанта объемом фигуры, построенной при помощи вектор-столбцов матрицы.

Специалисты по теории чисел, в частности Скарпи [3], довольно быстро нашли методы поиска матриц Адамара для последовательностей порядков, отличных от сильвестровых. Пэли [4], апеллируя к *комбинаторным алгоритмам*, позволяющим выйти на порядки, отличные от матриц Скарпи и Сильвестра, вывел заключение, что такие алгоритмы будут возникать и впредь, позволяя все полнее закрывать область $n = 4k$, т. е. сформулировал положение, называемое ныне *гипотезой Адамара*, о существовании всех матриц отмеченных порядков.

Матрицы максимального, в контексте задачи, решаемой Адамаром, детерминанта существуют для любого порядка n . Адамар показал, что экстремальное по детерминанту решение на порядках $4k$ обладает качеством, положенным им в одно из определений выделенных им матриц. Поэтому сомнения в отношении существования таких матриц приложимы, скорее, к формулировке, предложенной Пэли. Сомнительна возможность построения универсальных комбинаторных алгоритмов, которыми он занимался. Отметим, что не все алгоритмы поиска матриц Адамара комбинаторны, есть и те, которые ориентированы на поиск экстремальных по детерминанту решений [5, 6].

Для эффективности поиска матриц Адамара существенно то, в какой форме мы их ищем, среди

них важное место принадлежит циклическим структурам. Напомним, что матрица называется *циклической*, если ее строки — производные циклических сдвигов вправо или влево (обратные циклические матрицы) элементов их первой строки, с размещением вытесняемых элементов, соответственно, в начале или в конце последовательности сдвигаемых элементов.

Простейшая циклическая форма матрицы непродуктивна. Это показал Райзер, заметно позднее возникновения общей теории поиска матриц Адамара, при помощи циклических блоков. Постфактум, в 1963 г., в одном из учебников [7] он обратил внимание на то, что ортогональность столбцов и циклическость противоречивы.

Гипотеза Райзера гласит, что порядок 4 — последний при попытке описать матрицу Адамара циклической матрицей.

Матрица Адамара второго порядка не циклическая, поэтому получается, что помимо порядка 4 есть еще первый порядок, где, собственно, свойство циклическости не к чему приложить. У такой матрицы только один элемент.

Ни гипотеза Райзера, ни гипотеза Адамара, при всей простоте их формулировок, не доказаны.

Поскольку Пэли [4, 8] в рамках двухблочной конструкции получил решения не для всех возможных порядков, состав блоков был расширен до четырех [9] в методах Вильямсона, Гетхальса — Зейделя и других (см. обзор методов построения матриц Адамара в статье Себерри и Ямады [10]).

Двуциклические матрицы исследованы менее полно, в частности, мало исследовано то, какую роль в их разрешимости играет симметрия циклических блоков. Именно этому направлению и посвящена наша статья.

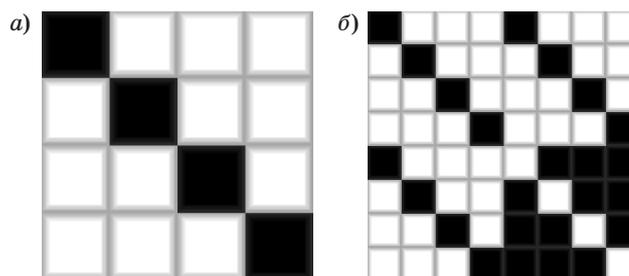
Двуциклические матрицы Адамара

Двуциклическая матрица Адамара — это матрица Адамара, построенная при помощи двух циклических блоков \mathbf{A} , \mathbf{B} одинакового размера вида

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{B}^T & -\mathbf{A}^T \end{pmatrix} \text{ или } \mathbf{H} = \begin{pmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ -\mathbf{B}^T & \mathbf{A}^T \end{pmatrix}, \quad (2)$$

вторая форма используется для матриц с подчеркнутой асимметрией.

Для примера приведем две симметричные матрицы (рис. 1). Циклическую матрицу Адамара четвертого порядка мы будем называть матрицей Райзера, поскольку она эквивалентна всем прочим циклическим матрицам такого сорта и обладает заключительным порядком в соответствующей гипотезе (рис. 1, а). Вторая матрица тоже исключительная в своем качестве: это, как видно, двуциклическая матрица, построенная при



■ Рис. 1. Портреты матриц Райзера (а) и двуциклической матрицы Райзера (б)

помощи одной циклической матрицы Райзера $\mathbf{A} = \mathbf{B}$ (рис. 1, б).

Если верна гипотеза Райзера, двуциклических матриц выше восьмого порядка с таким свойством, как равенство порождающих ее блоков, не бывает.

Заметим, что матрица Райзера не только циклическая, но и симметричная. Симметрия — это дополнительное ужесточающее условие существования матрицы качества, и в нашу задачу входит проверить, на каком порядке оно входит в противоречие с условием ортогональности матрицы качества. Следующая гипотеза касается не столько двуциклических, сколько *симметричных двуциклических* матриц.

Расширенная гипотеза Райзера

Гипотеза 1 (расширенная гипотеза Райзера). Не существует *симметричных двуциклических матриц* порядков, больших 32.

Предположение, что ограничения, отмеченные Райзером [7], распространяются на двуциклические структуры [11], стало основой для проверки его компьютерным экспериментом.

Здесь и далее мы будем обозначать порядок матрицы Адамара $n = 2v$, где v — порядок двух ее циклических блоков, четверть размера матрицы встречается во многих формулировках (размер матрицы Вильямсона [9, 12], например), поэтому обозначим ее как $p = n/4 = v/2$.

Тогда отмеченная выше гипотеза 1 звучит так. Не существует симметричных двуциклических матриц с $p > 8$.

Заметим, что с увеличением числа блоков характер достижимых симметричных конфигураций меняется.

Матрицы Вильямсона, например, симметричны по определению. Каталог матриц Вильямсона [12], составленный вплоть до порядков блоков 59, содержит первый проблемный порядок 35, указанный в работе [13]. Не выявлено пока ограничение сверху на максимальный порядок матриц Вильямсона, и мало исследована, кстати, возможность построения из них симметричных массивов.

В отношении сходных кососимметричных решений в составе массивов Гетхальса — Зейделя есть предположение, что они всегда существуют.

Определение пары Голея

Двуматричная матрица Адамара, помимо общего ее определения, может быть определена через квадратичное уравнение для ее блоков: $\mathbf{AA}^T + \mathbf{BB}^T = n\mathbf{I}$. Так как блоки циклические, то это матричное уравнение можно упростить, заменив вторые сомножители первыми их столбцами, системообразующими для циклических матриц, обозначив их как векторы \mathbf{a} и \mathbf{b} . Отсюда следует

$$\mathbf{Aa} + \mathbf{Bb} = \mathbf{ne}, \quad (3)$$

где \mathbf{e} — вектор нулей, за исключением первой 1 (первый столбец единичной матрицы \mathbf{I}).

В теории сигналов произведения $\mathbf{x} = \mathbf{R(A)a}$ и $\mathbf{y} = \mathbf{R(B)b}$, где $\mathbf{R(A)}$ и $\mathbf{R(B)}$ — верхние правые треугольники циклических матриц, трактуются как *автокорреляционные функции* бинарных последовательностей (сигналов) \mathbf{a} и \mathbf{b} . Здесь термин бинарные означает, что элементы таких сигналов равны 1 и -1 .

В нашей работе мы будем различать два сорта автокорреляционных функций: *периодические* и *аперипериодические*.

Определение 1. Периодической автокорреляционной функцией (ПДФ) бинарной последовательности \mathbf{a} называется произведение $f = \mathbf{Aa}$.

Название «периодические» следует из логики формирования строк циклической матрицы \mathbf{A} периодическим сдвигом. Соответственно, второй сорт функций называется аперипериодическим.

Определение 2. Аперипериодической автокорреляционной функцией (АДФ) бинарной последовательности \mathbf{a} называется произведение $f^* = \mathbf{R(A)a}$.

Определение 3. Две бинарные последовательности \mathbf{a} и \mathbf{b} образуют периодическую пару Голея длины v , если сумма их периодических автокорреляционных функций равна 0 (за исключением первого элемента суммы $n = 2v$).

При замене прилагательного «периодических» на «аперипериодических» мы получаем определение *аперипериодической (или ординарной) пары Голея*.

Лемма 1. Пусть \mathbf{a} и \mathbf{b} — бинарные последовательности длины v , и пусть \mathbf{A} и \mathbf{B} — соответствующие им циклические матрицы. В таком случае матрица (2) — матрица Адамара тогда и только тогда, когда (\mathbf{a}, \mathbf{b}) — периодическая пара Голея.

Опора на более простые ординарные пары была использована М. Голеем ввиду широкого употребления в теории сигналов аперипериодических автокорреляционных функций (т. е. если прилагательное опускается, то имеются в виду именно такие функции). Вместе с тем проблема нахождения двуматричных матриц Адамара эквива-

лентна проблеме построения *периодических пар Голея*.

Соответственно, периодические пары Голея играют основную роль в построении двуматричных матриц Адамара, в то время как аперипериодические — побочную, они — подмножество периодических пар.

Периодические пары Голея

Порядки периодических пар Голея, на которых пар Голея нет, впервые исследовал второй автор, первая такая пара им была получена для размера $v = 34$ [14].

Она принадлежит к множеству периодических пар Голея. Важный вопрос заключается в том, когда такие пары существуют. Мы говорим, что v — периодическое число Голея, если существует периодическая пара Голея длины v . Для обновления списка известных периодических номеров Голея см. каталог в работе [16]. В частности, известны периодические числа Голея ≤ 200 : 1, 2, 4, 8, 10, 16, 20, 26, 32, 34, 40, 50, 52, 58, 64, 68, 72, 74, 80, 82, 100, 104, 116, 122, 128, 136, 144, 148, 160, 164, 200. В отношении классических теперь уже пар Голея есть следующая информация. Существуют не сводимые друг к другу независимые пары, найденные для длины $g = 8$, а также 10 и 26. Методы расчета составных ординарных пар Голея длин, равных произведению отмеченных показателей, хорошо известны, простейший алгоритм сводится к удвоению длины $[\mathbf{a}, \mathbf{b}]$, $[\mathbf{a}, -\mathbf{b}]$. Периодическая пара длины v , в свою очередь, может быть преобразована к периодической паре длины vg [16].

Выскажем предположение, что вопрос существования пар во многом сводится к матричной интерпретации теоремы Ферма, первое известное доказательство ее методом спуска предложено Эйлером.

Теорема Ферма. Простое $p = 1 \pmod 4$ всегда разложимо на сумму двух квадратов $p = x^2 + y^2$.

Если $v > 1$ — периодическое число Голея, тогда известно, что оно должно быть четным, скажем, $v = 2p$, и p должно быть суммой двух квадратов. Кроме того, есть дополнительное арифметическое условие, полученное Арасу и Чангом (см. следствие 3.6 [19]), которое должно выполняться. Нет примеров, в которых v , не принадлежащее к периодическим числам Голея, удовлетворяло перечисленным выше условиям.

Мы выделяем важный особый случай, в котором простое $p = 1 \pmod 4$.

Гипотеза 2. Если $p = 1 \pmod 4$ — простое число, то $v = 2p$ — периодическое число Голея.

По теореме Ферма мы имеем $p = x^2 + y^2$, где x и y — неотрицательные целые, которые мы можем упорядочить, пусть $x > y$. Если такое v в самом деле периодическое число Голея, тогда существует периодическая пара Голея (\mathbf{a}, \mathbf{b}) длины v такая,

что числа $r = p - x$ и $s = p - y$ отвечают количествам -1 в \mathbf{a} и \mathbf{b} .

При $p < 100$ не найдена, например, пока пара для $p = 53, v = 106$ [17].

Случай $p \equiv 3 \pmod 4$ известен тем, что такое простое число не разложимо на сумму двух квадратов, указанный выше расчет не осуществим и периодическая пара Голея не существует [18]. Тем не менее длина, содержащая такое число множителей в четной степени, реализуема. Например, существует периодическая пара Голея для $v = 72, p = 36 = 4 \times 3^2$ [16, 19].

Классы эквивалентности

Ординарные пары Голея потому и дают ортогональные матрицы, что принцип их комбинирования состоит в уходе от симметрии. Для симметрии надо объединять пары, объединенные реверсом (обратным порядком элементов), тогда как комплементарные пары Голея нарастают инверсией знака $[\mathbf{a}, \mathbf{b}], [\mathbf{a}, -\mathbf{b}]$. Количество периодических пар Голея существенно превышает количество ординарных пар. И это их преимущество позволяет найти среди них те, которые продуцируют симметричные матрицы.

Пусть $(\mathbf{a}; \mathbf{b})$ — периодическая пара Голея длины $v = 2p$ вида $\mathbf{a} = (a_0, a_1, \dots, a_{v-1})$ и $\mathbf{b} = (b_0, b_1, \dots, b_{v-1})$.

Элементарными преобразованиями пары называются следующие:

- 1) замена \mathbf{a} на $-\mathbf{a}$;
- 2) замена \mathbf{b} на $-\mathbf{b}$;
- 3) замена в \mathbf{a} порядка элементов на обратный;
- 4) замена в \mathbf{b} порядка элементов на обратный;
- 5) замена \mathbf{a} на $(a_1, \dots, a_{v-1}, a_0)$;
- 6) замена \mathbf{b} на $(b_1, \dots, b_{v-1}, b_0)$;
- 7) взаимные замены \mathbf{a} и \mathbf{b} ;
- 8) замена \mathbf{a} на $(a_0, a_k, a_{2k}, \dots, a_{(v-1)k})$ и \mathbf{b} на $(b_0, b_k, b_{2k}, \dots, b_{(v-1)k})$, где целое k — просто с v , а индексы редуцированы по модулю v ;
- 9) замена a_i на $-a_i$ и b_i на $-b_i$ для каждого нечетного индекса i .

Отметим, что применение любого из этих элементарных преобразований к $(\mathbf{a}; \mathbf{b})$ ведет снова к периодической паре Голея. Преобразования 1–6 сохраняют РАФ, в то время как остальные — меняют (как правило) и употребляются к \mathbf{a} и \mathbf{b} .

Определение 4. Периодические пары Голея $(\mathbf{a}; \mathbf{b})$ и $(\mathbf{c}; \mathbf{d})$ эквивалентны, если одна может быть получена из другой конечной последовательностью элементарных преобразований.

Дефекты симметрии и кососимметрии

Верхние строки матриц \mathbf{A} и \mathbf{B} — это бинарные последовательности \mathbf{a} и \mathbf{b} . У симметричных матриц первый элемент a_0 значения для симметрии (или асимметрии) не имеет, следующие после

первого элементы повторяются с конца, скажем, $a_1 = a_{v-1}$ (последний), $a_2 = a_{v-2}$ и т. п. Индекс симметрии ζ бинарной последовательности \mathbf{a} длины v — это наибольшее значение $\zeta \leq p = v/2$ для попарно совпадающих между собой первых ее элементов от начала и от конца $a_j = a_{v-j}$ для всех $j = 1, \dots, \zeta - 1$.

Позиционирование совпадающих элементов расчетом их от начала можно признать мало существенным. Периодическая бинарная последовательность \mathbf{a} — это точки, лежащие на круге. По типографическим соображениям мы описываем ее как последовательность на линии $\mathbf{a} = (a_0, a_1, \dots, a_{v-1})$, однако циклический сдвиг элементов верно отражает картина круга. Индексы при операциях с \mathbf{a} всегда редуцируются по модулю v . Это свойство используется для введения мер симметрии и асимметрии ниже.

Отмеченный выше параметр $p = v/2$ ограничивает набор индексов $P = \{1, 2, \dots, p-1\}$.

Определение 5. Дефект симметрии, s -дефект, $d(\mathbf{a}) = \min_{0 \leq i < v} |\{j \in P \mid a_{i+j} \neq a_{i-j}\}|$.

Определение 6. Дефект кососимметрии, k -дефект, $\delta(\mathbf{a}) = \min_{0 \leq i < v} |\{j \in P \mid a_{i+j} = a_{i-j}\}|$.

Здесь $|X|$ означает мощность (число элементов) набора X , т. е. число несовпадений или совпадений соответственно.

Судя по определениям 5 и 6, на первый взгляд, кажется, что $d(\mathbf{a}) + \delta(\mathbf{a}) = p - 1$ всегда. Это не так. Все, что мы имеем, это неравенство $d(\mathbf{a}) + \delta(\mathbf{a}) \leq p - 1$, которое может быть строгим. В самом деле, если $\mathbf{a} = (1, 1, 1, -1)$, то $v = 4$ и $p - 1 = 1$, тогда как $d(\mathbf{a}) = \delta(\mathbf{a}) = 0$.

Лемма 2. Если (\mathbf{a}, \mathbf{b}) — периодическая пара Голея, то $\{d(\mathbf{a}), d(\mathbf{b}), \delta(\mathbf{a}), \delta(\mathbf{b})\}$ — инварианты для элементарных преобразований.

Доказательство: Применительно к преобразованиям 1–7 очевидно.

Давайте проверим это для преобразования 8. Обозначим $\mathbf{a}' = (a_0, a_k, a_{2k}, \dots, a_{(v-1)k})$ и $\mathbf{b}' = (b_0, b_k, b_{2k}, \dots, b_{(v-1)k})$. Сначала докажем, что $d(\mathbf{a}') = d(\mathbf{a})$.

Пусть i из $\{1, 2, \dots, v - 1\}$ принимает произвольное значение. Поскольку k взаимно просто с v , последовательность

$(a_{k(i+1)}, a_{k(i-1)}, a_{k(i+2)}, a_{k(i-2)}, \dots, a_{k(i+p-1)}, a_{k(i-p+1)})$ — это перестановка последовательности

$$(a_{ki+1}, a_{ki-1}), (a_{ki+2}, a_{ki-2}), \dots, (a_{ki+p-1}, a_{ki-p+1}).$$

Следовательно, для каждого i имеем

$$|\{j \in P \mid a_{ki+j} \neq a_{ki-j}\}| = |\{j \in P \mid a_{ki+kj} \neq a_{ki-kj}\}|.$$

Эти равенства подразумевают

$$\begin{aligned} \min_{0 \leq i < v} |\{j \in P \mid a_{ki+j} \neq a_{ki-j}\}| &= \\ &= \min_{0 \leq i < v} |\{j \in P \mid a_{ki+kj} \neq a_{ki-kj}\}|, \end{aligned}$$

т. е. что $d(\mathbf{a}') = d(\mathbf{a})$. По тем же соображениям $d(\mathbf{b}') = d(\mathbf{b})$ и также $\{d(\mathbf{a}'), d(\mathbf{b}')\} = \{d(\mathbf{a}), d(\mathbf{b})\}$. Справедливость $\{\delta(\mathbf{a}'), \delta(\mathbf{b}')\} = \{\delta(\mathbf{a}), \delta(\mathbf{b})\}$ доказывается сходно.

Доказательство утверждения для преобразования 9 выглядит проще и опущено.

Отсюда минимумы $\min[d(\mathbf{a}), d(\mathbf{b})]$, $\min[\delta(\mathbf{a}), \delta(\mathbf{b})]$ и суммы $d(\mathbf{a}) + d(\mathbf{b})$, $\delta(\mathbf{a}) + \delta(\mathbf{b})$ — константы для каждого класса эквивалентности.

Определение 7. Пусть E — класс эквивалентности периодических пар Голея, тогда $d(E) = \min[d(\mathbf{a}), d(\mathbf{b})]$ и $\delta(E) = \min[\delta(\mathbf{a}), \delta(\mathbf{b})]$, где (\mathbf{a}, \mathbf{b}) принадлежит E .

Договоримся рассчитывать индекс симметрии $\zeta(\mathbf{A})$, а также дефекты $d(\mathbf{A})$ и $\delta(\mathbf{A})$ циклической матрицы через показатели порождающей ее бинарной последовательности. Для симметрии двуциклической матрицы достаточно требования симметрии первого ее блока $d(\mathbf{A}) = 0$. Двуциклические матрицы не могут быть строго кососимметрическими, дефект кососимметрии измеряет отстояние от структуры (2), наиболее приближенной к кососимметрической, с блоками $-\mathbf{V}^T, \mathbf{A}^T$ в нижнем ряду.

Ремарка. Мы можем сформулировать гипотезу 1 иначе: не существует периодических пар Голея $(\mathbf{a}; \mathbf{b})$ длины $v > 16$ с $d(\mathbf{a}) = 0$.

Целое число 12 — наименьшее положительное целое n , делимое на 4, для которого нет двуциклической матрицы Адамара порядка n .

Алгоритм оптимизации детерминанта

Полный перебор, разумеется, — простейший алгоритм, дающий полную информацию о рассматриваемом случае, но невозможный в реализации на высоких порядках. Алгоритмы, опирающиеся на случайный выбор пар Голея, могут рассматриваться как стартовые, готовящие улучшенные условия для подключения алгоритмов иного типа, отличных от переборных [5]. Это новый вычислительный алгоритм, опирающийся на свойство матриц Адамара иметь максимальный детерминант. Процедура оптимизации детерминанта мало известна, поэтому мы ее опишем.

Класс $n \times n$ матриц с элементами, не превосходящими по модулю 1, выделенный Адамаром, включает в себя не оптимальные по детерминанту ортогональные матрицы, отличающиеся между собой m -нормой.

Определение 8. m -норма ортогональной матрицы $\mathbf{X} = (x_{ij})$ — это $\max_{i,j} |x_{ij}|$.

Матрицы, получаемые из ортогональных умножением их на скалярный множитель, будем называть в общем квазиортогональными. В задачах, связанных с нахождением матриц, оптимальных по модулю детерминанта, учитывается ограничение на модули элементов, поэтому далее

нас будут интересовать квазиортогональные матрицы в более узком их смысле.

Определение 9. Квазиортогональная матрица $\mathbf{X} = (x_{ij})$, этот результат умножения ортогональной матрицы на скаляр такой, что $\max_{ij} |x_{ij}| = 1$.

Поскольку матрицы, ортогональная и квазиортогональная, — это, по сути, одна и та же матрица до и после ее масштабирования, m -норму ортогональной матрицы договоримся считать также показателем квазиортогональной матрицы. Тогда если \mathbf{X} — квазиортогональная матрица и m — ее m -норма, то $m\mathbf{X}$ ортогональна.

Лемма 3. Если \mathbf{X} — квазиортогональная матрица порядка n и m — ее m -норма, то $|\det \mathbf{X}| = \frac{1}{m^n}$.

Согласно гипотезе Адамара, на выделенных им порядках оптимизация приводит к матрицам, всеми элементами достигающими ограничения 1 или -1 . В общем случае, как им доказано, число экстремальных по модулю элементов меньше n^2 . Отличные от адамаровых матрицы рассмотрены подробнее в работе [5].

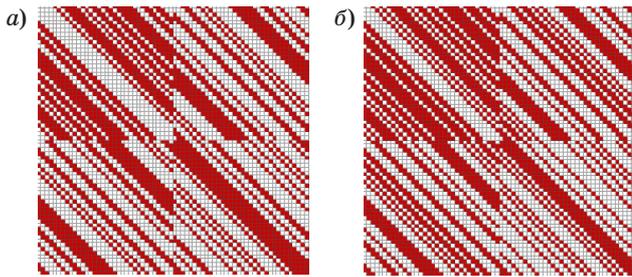
Как следует из неравенства Адамара, предложенные им матрицы экстремальны по детерминанту. Иными словами, отвечающие им матрицы \mathbf{X} — это минимаксные ортогональные матрицы, матрицы с минимально возможным максимальным модулем их элементов m .

Определение 10. h -норма (адамарова норма) квазиортогональной матрицы — это величина $h = m\sqrt{n}$.

Целесообразность введения h -нормы состоит в том, что она равна 1 для матриц Адамара (максимальный элемент связанной с ней ортогональной матрицы $m = 1/\sqrt{n}$). Это инвариант таких матриц и, в более широком толковании, инвариант преобразования Сильвестра, т. е. инвариант операции, которой Сильвестром были получены первые матрицы интересного нам класса. У всех остальных квазиортогональных матриц показатель h больше единицы. Из рассмотренных выше свойств оптимальных по детерминанту матриц следует алгоритм [5] нахождения матриц Адамара.

На первом этапе генерируется некоторое количество случайных пар $(\mathbf{a}_0, \mathbf{b}_0)$. Из них выбираем пару с минимальной невязкой $\text{PAF}(\mathbf{a}) + \text{PAF}(\mathbf{b}) = ne$, наиболее близкую по свойствам к периодической паре Голея. Полученную на ее основе двуциклическую матрицу нормируем делением ее элементов на \sqrt{n} .

На втором этапе алгоритмом Грамма — Шмидта неортогональная матрица сводится к ортогональной \mathbf{X} , после чего выясняется ее адамарова норма. Если $h = 1$, перед нами матрица Адамара. Если $h > 1$, изменим амплитуду элементов \mathbf{X} некоторым порогом насыщения $\rho < m$ так, что



■ **Рис. 2.** Портреты начальной (а) и оптимальной (б) матриц

если $|x_{ij}| \leq \rho$, то x_{ij} не меняется, иначе $x_{ij} = \rho$ или $x_{ij} = -\rho$ в соответствии со знаком элемента. Значение ρ может быть константой или итерационно повышаемым до значения m числом, это область эвристических предложений. Разумеется, матрица теряет при этом ортогональность, но мы и начинали с неортогональной матрицы.

Повторим ортогонализацию и уменьшение m -нормы, этот итерационный процесс завершится либо глобальным максимумом модуля детерминанта, либо локальным экстремумом. В первом случае финальную двучиклическую матрицу умножением ее элементов на \sqrt{n} приводим к матрице Адамара с элементами 1 и -1. Во втором случае, при заикливание процедуры в окрестности локального экстремума $h > 1$, поиск матрицы повторяется с этапа 1.

Процедура Грамма — Шмидта чувствительна к порядку следования столбцов, работа алгоритма улучшается, если в первую очередь обрабатываются измененные столбцы. Чтобы не нарушать циклической структуры матрицы, копить историю всех перестановок столбцов не обязательно, достаточно накапливать матрицу обратной перестановки.

На порядке 68, например, невязку 8 имеет пара (a_0, b_0) , порождающая матрицу, отображенную на рис 2, а. Сравнивая ее с полученной на втором этапе матрицей Адамара (рис 2, б), отвечающей периодической паре Голея (а, б), мы видим, что они отличаются несколькими побочными диагоналями циклических блоков. Иными словами, итерационная процедура выступает как алгоритм, исправляющий ошибки в бинарных последовательностях, близких к периодическим парам Голея.

Результаты компьютерного поиска

Результаты компьютерного исследования симметрии двучиклических матриц приведем в табл. 1.

Гипотеза 1 для $n = 2v > 32$, как видно, подтверждена для длин $v = 20, 26, 32, 34, 40$. Первый порядок, на котором ортогональность достигается с нарушением симметрии матрицы, отвечает

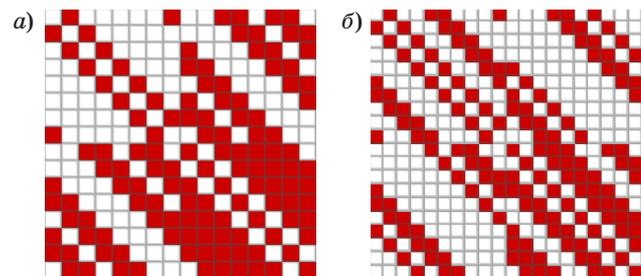
длине $v = 10$. Симметричная матрица порядка 16 (длина $v = 8$) существенно отличается от матрицы порядка 20 (длина $v = 10$) тем, что у последней минимальный дефект симметрии $d(A, B) = 1$ (рис. 3).

Порядок 32-граничный, на нем встречается 11 неэквивалентных между собой периодических пар Голея, 3 из них симметричны. Симметричные матрицы имеют попарно совпадающие между собой блоки (т. е. отвечают одной и той же РАГ одной из блоков) (рис. 4).

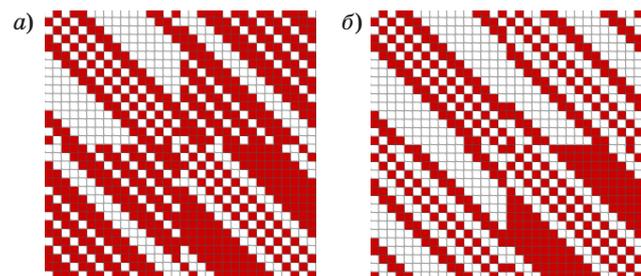
Парное решение соответствует корням матричного квадратичного уравнения (1), когда одной

■ **Таблица 1**

v	Минимальный дефект $\min d(E)$	Минимальный дефект $\min \delta(E)$	Количество классов эквивалентности	Есть ли симметричная матрица Адамара
2	0	0	1	Да
4	0	0	1	Да
8	0	0	2	Да
10	1	1	1	Нет
16	0	1	11	Да
20	1	1	34	Нет
26	1	2	53	Нет
32	1	0	838	Нет
34	2	3	256	Нет
40	1	1	9301	Нет



■ **Рис. 3.** Портреты матриц для длин $v = 8$ (а) и $v = 10$ (б)



■ **Рис. 4.** Портреты двух пар симметричных матриц для длин $v = 16$ (а) и (б)

■ Таблица 2

v	Классы эквивалентности	$d(A), d(B)$	$\delta(A), \delta(B)$
2	1) [0],[]	0,0	0,0
4	1) [0],[0]	0,0	0,0
8	1) [0,1,2,4],[0,3]	1,1	1,1
	2) [0,1,3,4],[0,2]	0,0	0,1
10	1) [0,1,3,5],[0,1,4]	1, 1	1, 1
16	11 классов эквивалентности		
	1) [0,1,2,3,6,10],[0,1,3,6,8,12]	2,2	1,1
	2) [0,1,2,4,5,10],[0,1,4,7,9,11]	2,2	2,2
	3) [0,1,2,4,6,9],[0,1,2,6,9,12]	2,0	1,2
	4) [0,1,2,4,6,9],[0,1,4,6,9,10]	2,0	1,2
	5) [0,1,2,4,6,9],[0,1,5,7,8,11]	2,2	1,1
	6) [0,1,3,4,7,9],[0,1,5,6,8,10]	2,2	2,2
	7) [0,1,3,5,6,9],[0,1,2,5,9,11]	1,2	2,1
	8) [0,1,3,5,6,9],[0,1,3,5,9,10]	1,1	2,2
	9) [0,1,3,5,7,8],[0,1,2,6,9,12]	0,0	2,2
	10) [0,1,3,5,7,8],[0,1,4,6,9,10]	0,0	2,2
11) [0,2,3,4,6,11],[0,1,2,6,9,12]	0,0	2,2	
20	34 класса эквивалентности		
	1) [0,1,2,3,4,6,9,10,14],[0,1,4,8,10,13,15]	2,2	3,3
	2) [0,1,2,3,4,7,9,11,14],[0,1,3,6,7,11,15]	4,2	3,3
	3) [0,1,2,3,4,8,10,13,16],[0,1,3,5,6,10,14]	2,2	3,2
	4) [0,1,2,3,5,6,9,13,15],[0,2,3,5,9,10,14]	3,3	3,3
	5) [0,1,2,3,5,7,8,11,15],[0,1,2,5,9,11,14]	3,3	3,3
	6) [0,1,2,3,5,7,9,12,13],[0,1,3,6,7,10,15]	2,2	3,3
	7) [0,1,2,3,5,7,10,11,14],[0,1,3,5,8,9,15]	3,3	2,3
	8) [0,1,2,3,5,8,11,15,16],[0,1,2,4,6,10,13]	2,2	2,2
	9) [0,1,2,3,6,7,9,11,13],[0,1,4,5,7,12,15]	3,3	3,2
	10) [0,1,2,3,6,7,9,11,15],[0,1,3,4,8,10,13]	3,3	3,3
	11) [0,1,2,3,6,7,9,11,15],[0,2,3,5,9,10,13]	3,3	3,3
	12) [0,1,2,3,6,7,10,12,14],[0,1,4,5,7,10,12]	3,3	2,2
	13) [0,1,2,3,6,7,10,12,14],[0,2,3,5,8,9,13]	3,3	2,3
	14) [0,1,2,3,6,7,11,13,15],[0,2,3,5,8,9,12]	3,3	3,3
	15) [0,1,2,3,6,8,10,11,15],[0,1,3,4,7,9,13]	4,3	2,3
	16) [0,1,2,3,6,8,10,12,15],[0,1,2,5,6,9,12]	3,3	3,2
	17) [0,1,2,3,6,9,11,13,17],[0,1,2,5,7,8,12]	3,3	2,2
	18) [0,1,2,3,7,8,11,13,16],[0,1,3,4,7,9,11]	2,3	2,3
	19) [0,1,2,4,5,6,9,12,14],[0,1,2,5,7,11,14]	1,3	3,3
	20) [0,1,2,4,5,6,9,12,15],[0,1,2,6,8,10,13]	3,3	3,3
	21) [0,1,2,4,6,7,9,10,14],[0,1,2,5,9,11,14]	3,3	3,3
	22) [0,1,2,4,6,7,11,14,15],[0,1,2,4,6,9,12]	3,3	3,3
	23) [0,1,2,4,7,9,10,11,15],[0,1,3,5,6,9,13]	3,1	3,3
	24) [0,1,2,5,6,7,9,13,16],[0,1,2,4,7,10,12]	2,2	1,2
	25) [0,1,2,5,6,7,10,12,14],[0,1,3,4,7,10,12]	2,2	2,2
	26) [0,1,2,5,7,8,10,12,16],[0,1,2,3,6,9,13]	2,2	3,3
	27) [0,1,3,4,5,7,9,13,14],[0,1,2,5,7,10,13]	2,3	3,2
	28) [0,1,3,4,6,8,9,13,14],[0,1,2,4,6,10,13]	3,2	3,2
	29) [0,1,3,4,6,8,10,12,13],[0,1,3,4,8,9,14]	2,3	3,3
	30) [0,1,3,4,6,9,10,11,14],[0,1,2,5,7,9,13]	3,2	2,3
	31) [0,1,3,4,6,9,11,13,17],[0,1,2,3,7,8,12]	3,3	2,2
	32) [0,1,3,4,7,8,9,12,14],[0,1,2,4,6,11,14]	3,3	3,4
	33) [0,2,3,4,5,8,9,12,15],[0,1,2,5,7,11,13]	3,3	2,3
34) [0,2,3,6,7,9,10,12,14],[0,1,2,5,6,11,13]	2,2	3,3	

■ Окончание табл. 2

v	Классы эквивалентности	$d(A), d(B)$	$\delta(A), \delta(B)$
26	53 класса эквивалентности		
	1) [0,1,2,3,4,6,8,12,13,17,20],[0,1,3,4,8,9,11,14,16,20]	4,4	3,3
	2) [0,1,2,3,4,7,8,11,13,17,19],[0,2,3,5,7,8,13,14,17,21]	2,3	4,3
	3) [0,1,2,3,4,7,9,12,13,15,19],[0,1,2,5,6,9,11,13,18,21]	3,4	4,5
	4) [0,1,2,3,4,7,9,12,13,17,19],[0,1,4,6,7,10,12,14,15,19]	4,4	4,4
	5) [0,1,2,3,4,7,9,12,14,16,20],[0,1,4,5,9,10,11,13,16,19]	3,3	3,3
	6) [0,1,2,3,4,8,9,12,14,16,19],[0,1,2,4,7,8,10,13,17,22]	3,3	4,3
	7) [0,1,2,3,5,6,8,14,15,18,22],[0,1,2,5,7,9,11,12,17,20]	4,4	2,3
	8) [0,1,2,3,5,7,9,10,13,17,20],[0,1,4,5,6,10,12,15,17,18]	4,4	3,3
	9) [0,1,2,3,5,7,9,12,15,18,19],[0,1,2,4,6,7,11,12,15,20]	4,4	4,4
	10) [0,1,2,3,5,7,9,12,15,19,20],[0,2,3,4,8,9,12,13,15,18]	4,4	4,4
	11) [0,1,2,3,6,7,9,10,14,18,20],[0,1,2,4,5,7,12,15,17,21]	4,4	3,4
	12) [0,1,2,3,6,7,9,11,13,15,16],[0,1,2,6,9,10,13,16,18,21]	3,4	5,4
	13) [0,1,2,3,6,7,9,12,14,18,22],[0,1,2,3,4,8,11,13,16,20]	4,4	3,4
	14) [0,1,2,3,6,7,10,12,14,17,20],[0,1,2,3,5,7,11,12,15,20]	4,4	5,3
	15) [0,1,2,3,6,7,11,14,17,19,21],[0,1,2,3,5,8,9,12,14,18]	3,4	4,3
	16) [0,1,2,3,6,8,9,12,13,16,18],[0,1,2,4,8,9,11,13,16,22]	4,4	5,4
	17) [0,1,2,3,6,8,11,12,14,18,21],[0,1,3,4,5,8,10,12,16,17]	3,3	4,4
	18) [0,1,2,3,7,8,11,13,15,16,19],[0,2,3,6,7,9,11,12,16,18]	4,1	4,3
	19) [0,1,2,4,5,6,8,10,15,16,19],[0,1,2,6,8,9,11,14,18,21]	4,4	3,4
	20) [0,1,2,4,5,6,10,11,13,16,18],[0,2,3,4,8,10,11,14,17,21]	4,4	4,3
	21) [0,1,2,4,5,7,9,10,15,17,19],[0,1,2,5,6,9,12,13,15,21]	4,4	4,4
	22) [0,1,2,4,5,7,9,10,15,17,19],[0,1,4,5,6,10,12,13,16,19]	4,3	4,3
	23) [0,1,2,4,5,8,9,14,15,18,20],[0,1,2,3,5,7,9,12,17,20]	5,4	4,4
	24) [0,1,2,4,5,8,10,13,14,19,20],[0,1,2,4,5,8,10,12,15,17]	4,4	3,3
	25) [0,1,2,4,5,8,10,14,16,19,21],[0,1,2,4,5,8,11,12,13,18]	5,4	4,5
	26) [0,1,2,4,6,7,8,11,14,16,19],[0,1,2,4,6,9,10,15,16,19]	4,4	3,4
	27) [0,1,2,4,6,7,9,12,15,16,20],[0,2,3,4,5,9,10,13,17,19]	3,4	4,4
	28) [0,1,2,4,6,7,11,12,16,19,20],[0,1,2,3,5,7,9,12,15,18]	4,4	4,3
	29) [0,1,2,4,6,8,9,10,13,16,19],[0,1,2,5,6,11,12,14,16,19]	3,4	3,3
	30) [0,1,2,4,6,8,9,13,16,19,22],[0,1,2,3,5,6,10,12,17,18]	4,4	4,3
	31) [0,1,2,4,6,9,10,13,15,16,22],[0,1,3,4,5,9,11,12,14,19]	4,3	4,5
	32) [0,1,2,4,6,9,11,12,15,18,22],[0,1,2,4,5,6,11,12,14,19]	4,4	5,3
	33) [0,1,2,4,6,10,11,14,15,18,21],[0,1,2,3,4,7,9,12,14,20]	3,4	4,4
	34) [0,1,2,4,7,8,9,12,14,15,18],[0,1,2,5,7,10,11,14,16,18]	2,4	4,3
	35) [0,1,2,4,7,8,10,13,14,18,19],[0,1,2,4,5,8,10,12,15,17]	4,4	3,3
	36) [0,1,2,5,6,8,11,12,16,18,19],[0,1,3,4,6,8,9,13,15,17]	4,3	4,4
	37) [0,1,2,5,7,8,12,14,16,17,20],[0,1,2,4,6,9,10,11,14,17]	3,4	4,3
	38) [0,1,3,4,5,8,10,12,16,17,20],[0,1,2,3,6,8,11,12,14,21]	2,2	4,4
	39) [0,1,3,4,6,8,10,12,13,18,19],[0,1,2,3,5,8,12,13,16,22]	4,4	4,4
	40) [0,1,3,4,6,8,10,14,15,16,19],[0,1,2,4,7,8,9,12,18,21]	4,3	3,3
	41) [0,1,3,4,6,9,10,11,13,17,21],[0,1,2,4,5,7,12,13,17,19]	3,4	4,4
	42) [0,1,3,4,6,9,10,14,16,18,19],[0,1,2,3,6,7,10,12,14,21]	4,4	4,4
	43) [0,1,3,4,6,9,11,13,15,18,19],[0,1,2,3,6,7,8,12,16,19]	4,4	4,5
	44) [0,1,3,4,7,9,11,12,14,17,21],[0,1,2,3,4,8,9,13,15,19]	3,3	4,4
	45) [0,1,3,4,7,9,11,15,16,17,20],[0,1,3,4,6,8,11,12,13,18]	3,3	4,3
	46) [0,1,3,5,6,7,9,11,14,18,21],[0,1,2,3,5,9,10,15,16,19]	2,5	4,4
	47) [0,1,3,5,6,7,9,11,14,18,21],[0,1,3,4,5,9,10,16,17,19]	2,3	4,4
	48) [0,1,3,5,6,8,11,12,13,15,19],[0,1,2,5,6,9,11,15,17,18]	4,4	2,4
	49) [0,1,3,5,8,9,11,13,16,17,20],[0,1,2,3,4,7,9,13,14,19]	4,4	5,2
	50) [0,2,3,4,5,7,10,11,14,18,20],[0,1,2,5,6,7,11,14,17,19]	3,4	2,5
	51) [0,2,3,4,5,8,9,11,16,18,20],[0,1,2,5,6,7,10,14,17,20]	3,3	4,4
	52) [0,2,3,6,7,11,12,13,16,18,20],[0,1,2,3,4,7,9,12,15,19]	3,4	4,4
53) [0,2,4,5,6,10,12,13,15,18,19],[0,1,3,4,5,9,10,12,15,19]	5,5	3,3	

матрице \mathbf{A} отвечает пара возможных симметричных матриц \mathbf{B} . Парадокс состоит в том, что для $\text{PAF } \mathbf{x} = \mathbf{Aa}$ есть компенсирующая ее, с точностью до первого элемента, $\text{PAF } \mathbf{y} = \mathbf{Bb}$, разрешимая для нескольких (включая несимметричные решения) матриц. Этот парадокс повышает количество неэквивалентных между собой пар, хотя порождаемые ими матрицы имеют отмеченное внутреннее родство.

Длины $v = 20$ и, далее, $v = 40$ преемственны длине $v = 10$ и интересны в том отношении, что минимальный дефект $d(\mathbf{A}, \mathbf{B})$ для них не растет. Не надо забывать, впрочем, что уменьшение достигается поднятием $d(\mathbf{B})$ до 3 и 5 соответственно, что несущественно для симметрии матрицы в целом. Это наблюдение предполагает, что подобного сорта зависимость может распространяться и далее на порядки 80, 160, 320, 640 и т. п.

Уравновешенные решения с $d(\mathbf{A}) = d(\mathbf{B})$ имеют для длин 20, 26, 32 значение 2. В дальнейшем мы прогнозируем рост этого осредненного показателя, связанного с минимальным дефектом, тем, что он выше его.

В установлении справедливости гипотезы о граничном значении порядка 32 большое значение имеет порядок 64 ($v = 32$). В самом деле, все начальные симметричные матрицы отвечают порядкам матриц Сильвестра $n = 2^t$, t — целое. В отличие от предыдущего случая и случая $v = 26$ с $d(\mathbf{A}, \mathbf{B}) = 1$ — это наиболее ожидаемый порядок для проявления симметричной наследственности, если бы таковая была.

Тем не менее мы видим, что в сравнении с $v = 20$ случай $v = 32$ ровно такой же, минимальный дефект $d(\mathbf{A}, \mathbf{B}) = 1$ достигается увеличением дефекта второго плеча до значения $d(\mathbf{B}) = 3$, минимальная сумма дефектов $d(\mathbf{A}) + d(\mathbf{B}) = 4$, а не 0, как для стартовых значений, что свидетельствует о нарастании некоторой диспропорции с ростом порядка.

За полем нашего внимания оказались индексы симметрии. Стоит отметить, что в отличие от дефектов индекс симметрии чувствителен к порядку. Слишком большое его значение свидетельствовало бы о теоретической возможности ускорить поиск матрицы.

В табл. 2 все классы эквивалентности для $v = 2, 4, 8, 10, 16, 20, 26$ представлены последовательностями (а, б). Цифры при обозначении содержимого последовательностей обозначают порядковый номер -1 (в составе 1, -1). Например, для $v = 2$ обозначение $[0], []$ означает $[-1, 1], [1, 1]$.

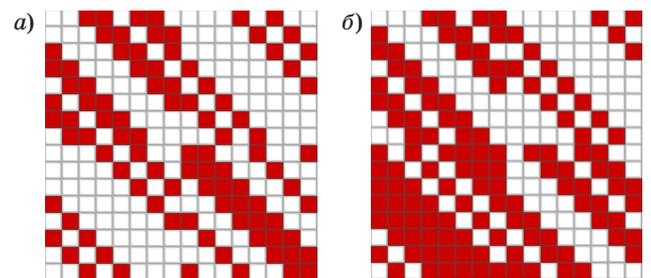
Первый нетривиальный пример, когда признаки симметрии $d(\mathbf{A}, \mathbf{B}) = 0$ и кососимметрии $\delta(\mathbf{A}, \mathbf{B}) = 0$ выделяют различные между собой варианты решений, наблюдаются при длине последовательностей $v = 8$ (рис. 5, а и б).

Поясним на примере рис. 5, б показатель $\delta(\mathbf{a}) = 0$. При $v = 8, p = 4$ значения проверяемых

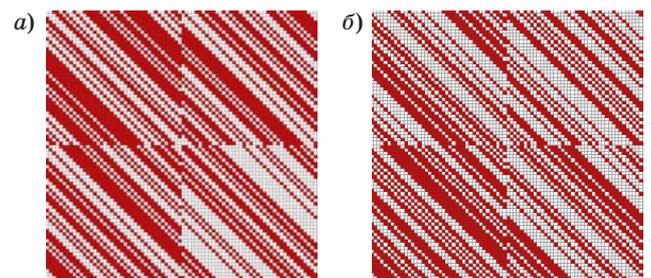
индексов $P = \{1, 2, 3\}$, причем $a_1 \neq a_{-1}, a_2 \neq a_{-2}, a_3 \neq a_{-3}$. С другой стороны, $a_4 = a_{-4}$, поскольку $4 = -4 \pmod{8}$. В общем, всегда $a_p = a_{-p}$. В табл. 3 представлена часть выявленных последовательностей в силу обширности классов эквивалентности для $v \geq 32$.

Для матриц порядков, больших 32, симметрия и кососимметрия в чистом виде, как мы полагаем, не достигается нигде. Приведем для сравнения два варианта из соседних классов эквивалентности с $d(\mathbf{A}, \mathbf{B}) = 1$ и $\delta(\mathbf{A}, \mathbf{B}) = 1$, это почти симметричная и почти кососимметричная матрицы при длине последовательностей $v = 40$ (рис. 6, а и б).

В примере рис. 6, б мы можем отметить, что для $p = 20$, помимо $a_p = a_{-p}$, есть еще одно равенство $a_2 = a_{-2}$. Таким образом, мы приходим к выводу, что противоречие между качествами, обеспечивающими симметрию или кососимметрию матрицы и ее ортогональность, неразрешимо для двуклических матриц, начиная с некоторого критического порядка. Минимальный дефект (симметрии, кососимметрии) для порядков, на которых существуют ординарные последовательности Голея, предположительно равен 1 (и достигается он на периодических парах), на прочих порядках этот показатель выше, вопрос в том, растет ли он с порядком. Переход к блочной конструкции с тремя и четырьмя составляющими позволяет глубже охватить различные типы симметрий, такие матрицы легче в своем отыскании ввиду элементарного сокращения вычислений [20].



■ Рис. 5. Матрицы симметричная (а) и почти кососимметричная (б) для $v = 8$



■ Рис. 6. Матрицы почти симметричная (а) и почти кососимметричная (б) для $v = 40$

■ Таблица 3

v	Представители классов эквивалентности	$d(A), d(B)$	$\delta(A), \delta(B)$
32	1) [0,1,2,4,5,7,9,11,12,15,16,17,20,22,23,24],[0,1,4,6,7,8,10,13,14,19,22,24]	3,1	2,6
	2) [0,1,2,3,4,5,8,9,11,13,15,16,18,20,23,24],[0,1,2,4,7,8,10,14,17,22,23,28]	4,3	0,4
	3) [0,1,2,4,5,7,8,9,13,14,15,17,18,20,22,25],[0,1,2,4,6,10,11,12,16,19,22,25]	2,2	4,5
	4) [0,1,2,3,4,5,8,9,11,13,15,16,18,20,23,24],[0,1,2,6,7,8,10,14,17,20,23,28]	4,1	0,4
34	1) [0,1,2,3,5,7,9,11,12,13,14,18,19,21,24,27],[0,1,4,5,6,8,9,15,17,20,21,25,28]	2, 5	5,6
	2) [0,1,2,4,5,6,8,9,11,12,15,18,23,24,26,28],[0,1,2,3,5,7,10,14,15,19,20,26,28]	6, 4	4,3
	3) [0,1,2,3,4,5,7,9,11,14,17,19,23,24,27,28],[0,1,3,6,7,8,11,15,16,17,19,22,28]	3, 3	6,6
	4) [0,1,2,4,5,6,8,9,11,12,15,18,23,24,26,28],[0,1,2,3,5,7,10,14,15,19,20,26,28]	6, 4	4,3
40	1) [0,1,2,4,5,6,9,13,14,16,20,21,23,25,26,27,31,33], [0,1,3,4,6,9,10,11,14,16,17,19,20,26,28,32]	5,1	5,7
	2) [0,1,2,3,5,6,7,9,10,13,15,16,18,24,26,27,30,34], [0,1,2,5,7,9,12,13,14,19,22,23,24,27,29,33]	6,6	1,5
	3) [0,1,2,3,4,6,7,10,11,12,13,14,19,22,26,27,28,32], [0,1,2,4,7,9,12,13,17,19,22,24,26,30,33,36]	2,2	7,7
	4) [0,1,2,3,4,6,7,8,11,12,14,16,18,21,23,27,30,31], [0,1,2,3,6,9,10,16,18,21,23,24,28,29,32,34]	6,5	2,3
64	1) [0,1,2,3,4,5,6,12,13,16,19,20,22,24,25,28,30,33,35,37,40,42,45,46,50,51,57,58], [0,1,2,3,5,6,9,12,13,14,16,19,20,22,24,26,28,30,33,35,36,37,40,41,42,45,50,51]	2,8	12,11
	2) [0,1,2,3,4,5,6,9,11,13,18,19,23,25,26,29,31,32,34,36,38,39,47,49,50,53,58,59], [0,1,3,5,7,8,9,10,13,14,15,17,20,21,24,25,27,29,31,32,40,42,43,46,51,52,55,56]	11,7	4,10
	3) [0,1,2,3,4,5,6,8,11,12,13,15,16,18,21,26,28,29,32,33,38,40,42,47,48,51,52,59], [0,1,2,5,6,8,9,11,13,15,17,20,21,23,24,25,30,31,34,37,39,43,45,46,48,52,53,54]	4,4	11,11
	4) [0,1,2,3,4,6,7,9,12,14,19,20,21,22,23,24,27,28,31,34,35,38,42,44,50,52,55,61], [0,1,2,4,6,7,8,11,13,17,18,19,20,26,28,29,31,33,36,37,40,41,42,45,46,50,56,58]	11,11	5,5

Сравнение периодических и ординарных пар Голея

Эквивалентность ординарных пар Голея определяется примерно так же, как и периодических пар, мы используем только элементарные операции 1, 2, 3, 4, 7 и 9 [21]. Репрезентативные выборки классов эквивалентности таких пар для длин 2, 4, 8, 10, 16, 20, 26, 32 и 40 приведены в табл. 2–4 работы [21], из них возьмем номера выделенных классов. Каждый класс эквивалентности ординарных пар содержится в некотором одном классе эквивалентности периодических пар Голея, причем последний может вмещать в себя несколько таких классов.

Например, первый класс эквивалентности периодических пар Голея длины $v = 8$ содержит первые четыре класса ординарных пар. Отметим, что не все классы эквивалентности периодических пар Голея содержат ординарные пары. Впервые такое происходит для длины $v = 16$, в этом случае каждый из семи классов эквивалентности (1, 2, 3, 5, 6, 8 и 10) содержит некоторые ординарные пары Голея, но четыре остальных класса (4, 7, 9 и 11) не содержат их. В табл. 4 мы указываем классы эквивалентности периодических пар Голея для $v = 2, 4, 8, 10, 16, 20$ и 26, которые содержат, как минимум, один класс эквивалентности ординарных пар, перечисляя их все в последней колонке.

■ Таблица 4

v	Периодические пары Голея	Ординарные пары Голея
2	1	1
4	1	1
8	1 2	1, 2, 3, 4 5
16	1 2 3 5 6 8 10	3, 10, 11, 12, 14, 17, 18, 20, 29, 31 34, 36 33, 35 28 5, 6, 7, 8, 21, 22, 23, 24, 25, 27 1, 2, 4, 9, 13, 15, 16, 19, 30, 32 26
20	1 4 6 7 12 14 15 17 21 25 26 27 28 31 34	5, 17 2 20, 21 22, 23 19 7, 10 3 8, 16 14, 18 6 12, 13 24, 25 4, 15 1 9, 11
26	25	1

Взвешенные матрицы из периодических пар Голея

В этом разделе мы опишем две конструкции взвешенных матриц, использующих периодические пары Голея. Взвешенные матрицы обобщают матрицы Адамара, это тринарные матрицы W порядка n такие, что $W^T W = wI$, где $w > 0$ — целое. Значение слова «тринарные» состоит в том, что элементы W принадлежат набору $\{0, 1, -1\}$. Число w называют весом W и используют в обозначении $W(n, w)$ взвешенных матриц порядка n . Если $w = n$, то W — матрица Адамара.

Пусть (a, b) — периодическая пара Голея четной длины $v = 2p$.

Пусть A и B — соответствующие циклические матрицы порядка v . Они удовлетворяют уравнению $AA^T + BB^T = nI$.

Первая конструкция. Тринарные циклические матрицы $C = (A + B)/2$ и $D = (A - B)/2$ удовлетворяют уравнению $CC^T + DD^T = vI$. Соответственно, матрица

$$W = \begin{pmatrix} C & D \\ D^T & -C^T \end{pmatrix}$$

— взвешенная $W(n, v)$ с $n = 2v$.

Вторая конструкция. Здесь v — четное число, мы можем сжать последовательности a и b с масштабом 2 для получения последовательностей $a^{(p)}/2$ и $b^{(p)}/2$ длины $p = v/2$. Более детально вычисляем $a_i^{(p)} = a_i + a_{i+p}$ и $b_i^{(p)} = b_i + b_{i+p}$ для $i = 0, 1, \dots, p-1$. После деления каждого элемента $a^{(p)}$ и $b^{(p)}$ на 2 получаем две тринарные последовательности. Обозначим как E и F соответствующие тринарные циклические матрицы порядка p .

Предложение. Матрица

$$W = \begin{pmatrix} E & F \\ F^T & -E^T \end{pmatrix}$$

— взвешенная $W(v, p)$.

Доказательство: По теоремам 3 и 4 из работы [22] сжатые последовательности $a^{(p)}$ и $b^{(p)}$ коммутарны, т. е. сумма их RAF тождественна нулю везде, за исключением стартовой компоненты. То же самое касается тринарных последовательностей $a^{(p)}/2$ и $b^{(p)}/2$. Более того, согласно следствию 1 [22], общее число 0 в этих двух последовательностях равно p . Соответственно, общее число ненулевых компонент тоже равно p , отсюда $EE^T + FF^T = pI$. Из этого следует, что W — взвешенная матрица с весом p .

Например, возьмем $v = 82$, так как известно, что периодическая пара Голея длины 82 существует (согласно работе [17] и ссылкам). Тогда вторая конструкция дает взвешенную матрицу порядка 82 с весом 41. Согласно табл. 2.86 [23,

с. 291], вопрос существования взвешенной матрицы $W(82, 41)$ не был разрешен. Так что, возможно, это первый пример такой матрицы.

Заключение

В работе введены новые понятия отмеченных выше s - и k -дефектов, приводящие к некоторым формальным мерам расстояния до симметричных или асимметричных структур. Меры, в свою очередь, позволяют корректно ставить задачи на отыскание периодических пар Голея или соответствующих им двуциклических матриц Адамара, обладающих интересующим нас свойством в наиболее выраженной степени.

Экстремальные по отмеченным свойствам матрицы представляют собой непосредственный научный интерес, поскольку различного сорта симметрии — удобный классификационный признак для отделения более простых матриц от сложных. Симметрия, даже неполная, позволяет экономнее расходовать место на хранение информации. Настоящая работа содержит большое количество новых периодических пар Голея, найденных в ходе компьютерной проверки гипотезы об ограничении порядка симметричных двуциклических матриц Адамара значением 32. Выделены пары и соответствующие им матрицы, обладающие минимальными значениями дефектов симметрии и кососимметрии.

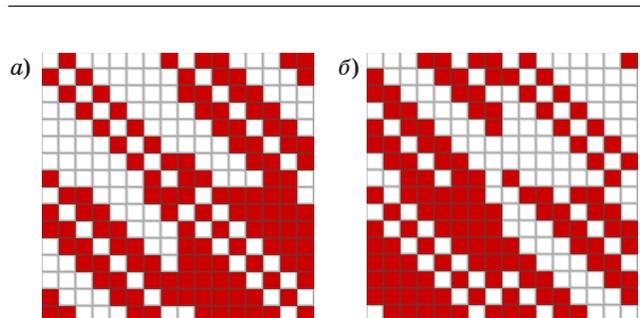
Кроме того, приведены полные таблицы представителей классов эквивалентности периодических пар Голея до длин 26 включительно, полученные в результате трудоемких компьютерных вычислений повышенной сложности. Проведен сопоставительный анализ классов ординарных и периодических пар Голея, используемых при построении двуциклических матриц. В силу повышенной вычислительной сложности задачи на отыскание периодических пар Голея, материал работы уникален и может служить проверочной базой для последующих исследований (см. прил. А, Б).

Рассмотрение взвешенных матриц, получаемых из периодических пар Голея, констатирует новые инварианты, например, сохранение свойства ортогональности при компрессии бинарных последовательностей до тринарных, вдвое меньших по размеру. Фиксация таких закономерностей очень весома, поскольку это приводит к двухкаскадным вычислительным алгоритмам, когда сначала отыскивается матрица вдвое меньшего порядка, чем искомая (ортогональная взвешенная матрица), а затем уже происходит окончательный поиск двуциклической матрицы Адамара.

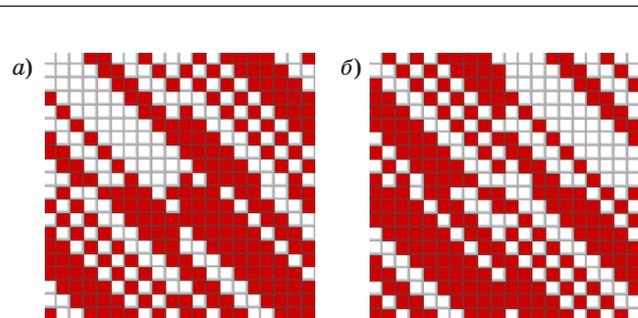
Благодарности: Д. Джокевич благодарит за общую поддержку NSERC. Эта работа осуществлена благодаря возможностям Shared Hierarchical Academic Research Computing Network (SHARCNET) и Compute/Calcul Canada.

ПРИЛОЖЕНИЯ

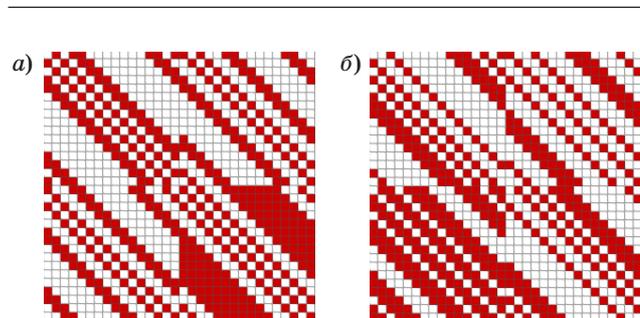
Приложение А. Двуматричные матрицы с минимальными дефектами симметрии и кососимметрии, $E(k)$ отсылает к k -му классу эквивалентности для отмеченной длины v



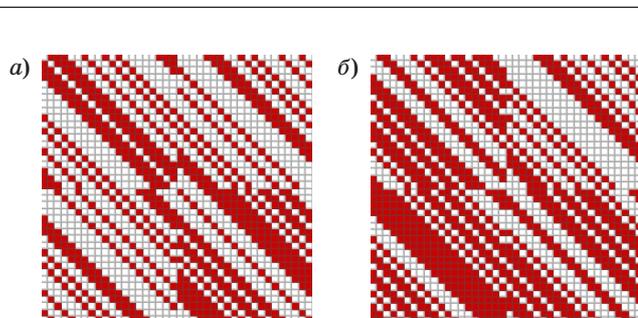
■ *Рис. А1.* $v = 8$ $E(2)$, $d(A) = 0$ (а); $\delta(A) = 0$ (б)



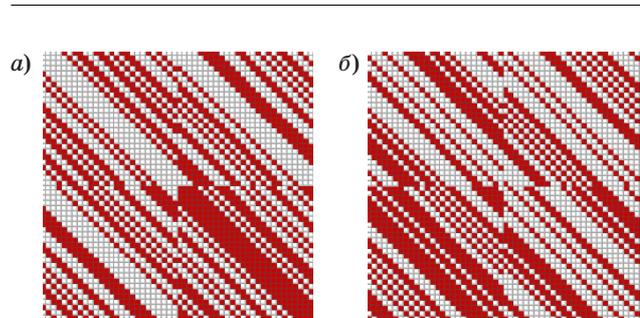
■ *Рис. А2.* $v = 10$ $E(1)$, $d(A) = 1$ (а); $E(1)$, $\delta(A) = 1$ (б)



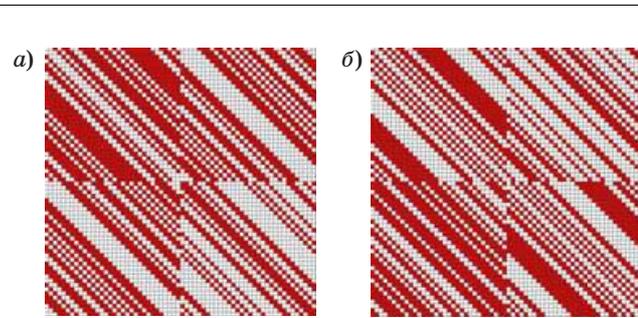
■ *Рис. А3.* $v = 16$ $E(10)$, $d(A) = 0$ (а); $E(3)$, $\delta(A) = 1$ (б)



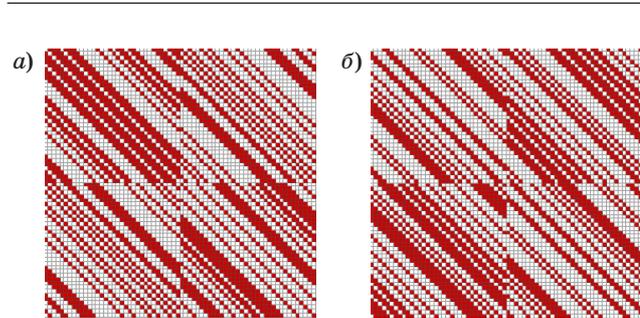
■ *Рис. А4.* $v = 20$ $E(19)$, $d(A) = 1$ (а); $E(24)$, $\delta(A) = 1$ (б)



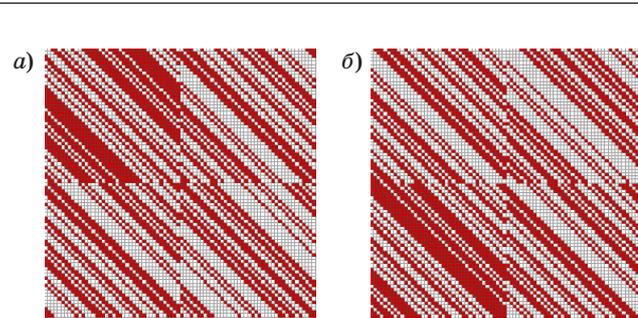
■ *Рис. А5.* $v = 26$ $E(18)$, $d(A) = 1$ (а); $E(7)$, $\delta(A) = 2$ (б)



■ *Рис. А6.* $v = 32$ $E(1)$, $d(A) = 1$ (а); $E(2)$, $\delta(A) = 0$ (б)



■ *Рис. А7.* $v = 34$ $E(1)$, $d(A) = 2$ (а); $E(2)$, $\delta(A) = 3$ (б)



■ *Рис. А8.* $v = 40$ $E(1)$, $d(A) = 1$ (а); $E(2)$, $\delta(A) = 1$ (б)

Приложение Б. Двуматричные матрицы с максимальным индексом симметрии

■ Таблица Б1

v	a, b	$\xi(a), \xi(b)$
2	[1],[1]	1,1
4	[2],[2]	2,2
8	[1,7],[1,2,6,7]	4,4
10	[3,4,7],[1,3,4,5,6,9]	4,3
16	[1,3,4,12,13,15],[1,4,5,11,12,15]	8,8
20	[1,2,3,5,10,11,12,15,17,18,19],[2,7,9,10,12,13,18]	8,8
26	[1,2,3,7,9,10,12,14,15,16,17,19,23,24,25],[2,5,6,8,11,12,13,14,17,24]	11,5
32	[1,2,5,7,9,10,11,12,14,15,16,19,20,21,22,23,25,27,30,31], [1,2,9,11,14,15,16,17,18,19,22,23,24,28,30,31]	13,4
34	[3,6,7,8,10,12,13,14,15,18,20,21,22,24,26,27,28,31], [1,2,3,6,7,12,13,14,15,16,18,21,23,24,25,26,28,29,31,32,33]	15,5
40	[1,2,3,4,6,7,9,13,15,16,18,19,20,23,24,25,27,31,33,34,36,37,38,39], [2,3,4,6,7,10,17,18,19,25,27,30,32,33,34,36,37,38]	17,8

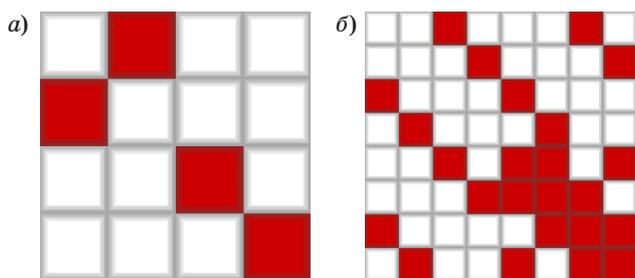


Рис. Б1. $v = 2, \zeta = p = 1$ (а); $v = 4, \zeta = p = 2$ (б)

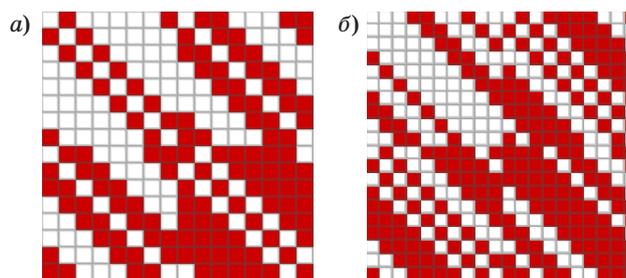


Рис. Б2. $v = 8, \zeta = p = 4$ (а); $v = 10, \zeta = 4 < p = 5$ (б)

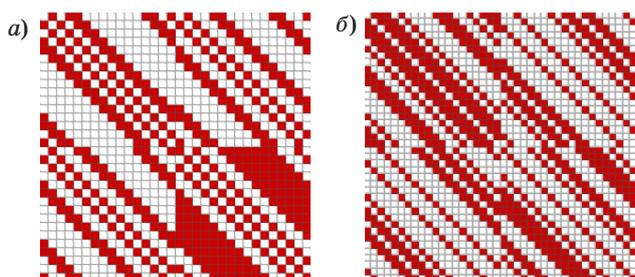


Рис. Б3. $v = 16, \zeta = p = 8$ (а); $v = 20, \zeta = 8 < p = 10$ (б)

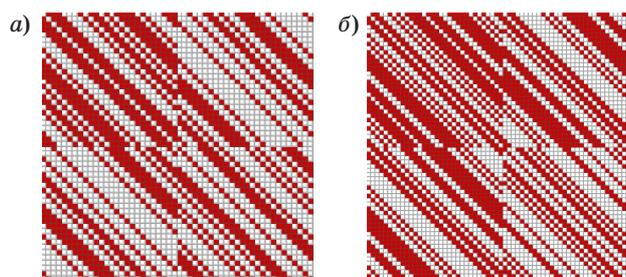


Рис. Б4. $v = 26, \zeta = 11 < p = 13$ (а); $v = 32, \zeta = 13 < p = 16$ (б)

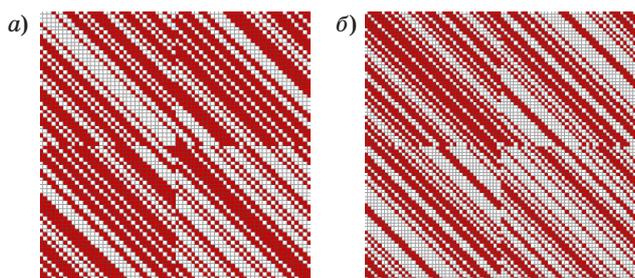


Рис. Б5. $v = 34, \zeta = 15 < p = 17$ (а); $v = 40, \zeta = 17 < p = 20$ (б)

Литература

1. Hadamard J. Résolution d'une Question Relative aux Déterminants//Bulletin des Sciences Mathematiques. 1893. Vol. 17. P. 240–246.
2. Sylvester J. J. Thoughts on Inverse Orthogonal Matrices, Simultaneous Sign Successions, and Tesselated Pavements in Two or More Colours, with Applications to Newton's Rule, Ornamental Tile-Work, and the Theory of Numbers//Philosophical Magazine. 1867. Vol. 34. P. 461–475.

3. Scarpis U. Sui Determinanti di Valore Massimo // Rendiconti della R. Istituto Lombardo di Scienze e Lettere. 1898. Vol. 31. P. 1441–1446.
4. Paley R. E. A. C. On Orthogonal Matrices // J. of Mathematics and Physics. 1933. Vol. 12. P. 311–320.
5. Балонин Н. А., Сергеев М. Б. Матрицы локального максимума детерминанта // Информационно-управляющие системы. 2014. № 1(68). С. 2–15.
6. Балонин Н. А., Сергеев М. Б. К вопросу существования матриц Мерсенна и Адамара // Информационно-управляющие системы. 2013. № 5(66). С. 2–8.
7. Ryser H. J. Combinatorial Mathematics // The Carus Mathematical Monographs. Published by The Mathematical Association of America. — New York: John Wiley and Sons, 1963. N 14. — 162 p.
8. Lint van J. H., Wilson R. M. A Course in Combinatorics. — Cambridge Univ. Press, 1992. Ch. 18. — 602 p.
9. Williamson J. Hadamard's Determinant Theorem and the Sum of Four Squares // Duke Math. J. 1944. Vol. 11. N 1. P. 65–81. doi:10.1215/S0012-7094-44-01108-7
10. Seberry J., Yamada M. Hadamard Matrices, Sequences, and Block Designs // Contemporary Design Theory: A Collection of Surveys/ J. H. Dinitz and D. R. Stinson eds. — John Wiley and Sons, 1992. — P. 431–560.
11. Balonin N. A. Two Circulant Hadamard Matrices, Mathematical Euler-net "Mathscinet.ru", 2014. <http://mathscinet.ru/catalogue/twocirculanthadamard/index.php> (дата обращения: 08.03.2015).
12. Holzmann W. H., Kharaghani H., Tayfeh-Rezaie B. Williamson Matrices Up to Order 59 // Designs, Codes and Cryptography. 2008. Vol. 46. Iss. 3. P. 343–352.
13. Djokovic D. Z. Williamson Matrices of Order $4n$ for $n = 33; 35; 39$ // Discrete Mathematics. 1993. N 115. P. 267–271.
14. Djokovic D. Z. Note on Periodic Complementary Sets of Binary Sequences // Designs, Codes and Cryptography. 1998. N 13. P. 251–256.
15. Golay M. J. E. Complementary Series // IRE Trans. Inform. Theory. 1961. Vol. IT-7. P. 82–87.
16. Djokovic D. Z., Kotsireas I. S. Periodic Golay Pairs of Length 72. arXiv:1409.5969v2 [math.CO] 27 Jan. 2015.
17. Djokovic D. Z., Kotsireas I. S. Some New Periodic Golay Pairs // Numerical Algorithms (to appear). doi 10.1007/s11075-014-9910-4. arXiv:1310.5773v2 [math.CO] 27 Aug. 2014.
18. Eliahou S., Kervaire M., Saffari B. A New Restriction on the Lengths of Golay Complementary Sequences // Journal of Combinatorial Theory. Ser. A. 1990. Vol. 55. N 1. P. 49–59.
19. Arasu K. T., Xiang Q. On the Existence of Periodic Complementary Binary Sequences // Designs, Codes and Cryptography. 1992. N 2. P. 257–262.
20. Di Matteo O., Djokovic D. Z., Kotsireas I. S. Symmetric Hadamard Matrices of Order 116 and 172 Exist. 2015. arXiv:1503.04226.
21. Djokovic D. Z. Equivalence Classes and Representatives of Golay Sequences // Discrete Mathematics. 1998. N 189. P. 79–93.
22. Djokovic D. Z., Kotsireas I. S. Compression of Periodic Complementary Sequences and Applications // Designs, Codes and Cryptography. 2015. N 74. P. 365–377.
23. Craigen R. and Kharaghani H. Orthogonal Designs, in Handbook of Combinatorial Designs. 2nd ed. / C. J. Colbourn, J. H. Dinitz (eds). Discrete Mathematics and its Applications (Boca Raton). Chapman & Hall/CRC, Boca Raton, FL, 2007. P. 280–295.

UDC 519.614

doi:10.15217/issn1684-8853.2015.3.2

Symmetry of Two-Circulant Hadamard Matrices and Periodic Golay PairsBalonin N. A.^a, Dr. Sc., Tech., Professor, korbendfs@mail.ruDjokovic D. Z.^b, PhD, Distinguished Professor Emeritus, djokovic@uwaterloo.ca^aSaint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint-Petersburg, Russian Federation^bUniversity of Waterloo, Department of Pure Mathematics and Institute for Quantum Computing, Waterloo, Ontario, N2L 3G1, Canada

Purpose: Construction of Hadamard matrices of two-circulant type. The role of symmetry and skew-symmetry of the circulant blocks in this construction is investigated systematically. Another goal of this work is to classify the periodic Golay pairs up to length 40. These pairs are closely related to the above mentioned construction. **Methods:** Computational methods of linear algebra, recursive methods of optimum search, exhaustive search to construct all periodic Golay pairs of a fixed length by using high-performance computers. **Results:** The paper discusses the problem of constructing Hadamard matrices of two-circulant type by introducing certain measures of symmetry (symmetry index, defects of symmetry and skew-symmetry) and enumerates the equivalence classes of periodic Golay pairs of small lengths. An analog of the Ryser's conjecture, the non-existence of circulant Hadamard matrices of order bigger than 4, has been proposed earlier by the first author. It asserts that there are no symmetric Hadamard matrices of two-circulant type and of order bigger than 32. The latter conjecture is verified in several cases by using a computer. A catalogue of the representatives of equivalence classes of two-circulant Hadamard matrices is presented in the form of a list of periodic Golay pairs of lengths up to 26 (inclusive). Examples of nearly symmetric two-circulant Hadamard matrices of relatively large order are given. **Practical relevance:** Hadamard matrices have direct practical applications to the problems of noise-immune coding and compression and masking of video information. Software for constructing two-circulant Hadamard matrices and a library of periodic Golay pairs, together with the online algorithms, are made available on the mathematical network <http://mathscinet.ru>.

Keywords — Orthogonal Matrices, Hadamard Matrices, Ryser's Conjecture, Circulant Matrices, Two-Circulant Matrices, Periodic Golay Pairs.

References

1. Hadamard J. Résolution d'une Question Relative aux Déterminants. *Bulletin des Sciences Mathématiques*, 1893, vol. 17, pp. 240–246 (In French).
2. Sylvester J. J. Thoughts on Inverse Orthogonal Matrices, Simultaneous Sign Successions, and Tessellated Pavements in Two or More Colours, with Applications to Newton's Rule, Ornamental Tile-Work, and the Theory of Numbers. *Philosophical Magazine*, 1867, vol. 34, pp. 461–475.
3. Scarpis U. Sui Determinanti di Valore Massimo. *Rendiconti della R. Istituto Lombardo di Scienze e Lettere*, 1898, vol. 31, pp. 1441–1446 (In Italian).
4. Paley R. E. A. C. On Orthogonal Matrices. *J. of Mathematics and Physics*, 1933, vol. 12, pp. 311–320.
5. Balonin N. A., Sergeev M. B. Local Maximum Determinant Matrices. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2014, no. 1(68), pp. 2–15 (In Russian).
6. Balonin N. A., Sergeev M. B. On the Issue of Existence of Hadamard and Mersenne Matrices. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2013, no. 5(66), pp. 2–8 (In Russian).
7. Ryser H. J. *Combinatorial Mathematics*. The Carus Mathematical Monographs, no. 14, Published by The Mathematical Association of America. New York, John Wiley and Sons, 1963. 162 p.
8. Lint van J. H., and Wilson R. M. *A Course in Combinatorics*. Cambridge Univ. Press, 1992, ch. 18. 602 p.
9. Williamson J. Hadamard's Determinant Theorem and the Sum of Four Squares. *Duke Math. J.*, 1944, vol. 11, no. 1, pp. 65–81. doi:10.1215/S0012-7094-44-01108-7
10. Seberry J., and Yamada M. Hadamard Matrices, Sequences, and Block Designs. *Contemporary Design Theory: A Collection of Surveys*. J. H. Dinitz and D. R. Stinson, eds. John Wiley and Sons, 1992. Pp. 431–560.
11. Balonin N. A. Two Circulant Hadamard Matrices, Mathematical Euler-net “Mathscinet.ru”, 2014. Available at: <http://mathscinet.ru/catalogue/twocirculanthadamard/index.php> (accessed 8 March 2015).
12. Holzmann W. H., Kharaghani H., Tayfeh-Rezaie B. Williamson Matrices Up to Order 59. *Designs, Codes and Cryptography*, 2008, vol. 46, iss. 3, pp. 343–352.
13. Djokovic D. Z. Williamson Matrices of Order $4n$ for $n = 33; 35; 39$. *Discrete Mathematics*, 1993, no. 115, pp. 267–271.
14. Djokovic D. Z. Note on Periodic Complementary Sets of Binary Sequences. *Designs, Codes and Cryptography*, 1998, no. 13, pp. 251–256.
15. Golay M. J. E. Complementary Series. *IRE Trans. Inform. Theory*, 1961, vol. IT-7, pp. 82–87.
16. Djokovic D. Z., Kotsireas I. S. Periodic Golay Pairs of Length 72. arXiv:1409.5969v2 [math.CO] 27 Jan. 2015.
17. Djokovic D. Z., Kotsireas I. S. Some New Periodic Golay Pairs. *Numerical Algorithms* (to appear). doi 10.1007/s11075-014-9910-4. arXiv:1310.5773v2 [math.CO] 27 Aug. 2014.
18. Eliahou S., Kervaire M., Saffari B. A New Restriction on the Lengths of Golay Complementary Sequences. *J. Combin. Theory. Ser. A*, 1990, vol. 55, no. 1, pp. 49–59.
19. Arasu K. T., and Xiang Q. On the Existence of Periodic Complementary Binary Sequences. *Designs, Codes and Cryptography*, 1992, no. 2, pp. 257–262.
20. Di Matteo O., Djokovic D. Z., Kotsireas I. S. Symmetric Hadamard Matrices of Order 116 and 172 Exist. 2015. arXiv:1503.04226.
21. Djokovic D. Z. Equivalence Classes and Representatives of Golay Sequences. *Discrete Mathematics*, 1998, no. 189, pp. 79–93.
22. Djokovic D. Z., Kotsireas I. S. Compression of Periodic Complementary Sequences and Applications. *Designs, Codes and Cryptography*, 2015, no. 74, pp. 365–377.
23. Craigen R., and Kharaghani H. *Orthogonal Designs, in Handbook of Combinatorial Designs*. 2nd ed. C. J. Colbourn, J. H. Dinitz (eds). Discrete Mathematics and its Applications (Boca Raton). Chapman & Hall/CRC, Boca Raton, FL, 2007. Pp. 280–295.

УДК 517.987

doi:10.15217/issn1684-8853.2015.3.17

ПОСТРОЕНИЕ НЕПРИВОДИМЫХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ СИММЕТРИЧЕСКОЙ ГРУППЫ $S(n)$ С БОЛЬШИМИ И МАКСИМАЛЬНЫМИ РАЗМЕРНОСТЯМИ

Н. Н. Васильев^а, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник

В. С. Дужин^а, соискатель

^аСанкт-Петербургское отделение Математического института им. В. А. Стеклова РАН, Санкт-Петербург, РФ

Введение: диаграммы Юнга и таблицы Юнга являются важными комбинаторными объектами. Асимптотическая комбинаторика изучает асимптотическое поведение параметров комбинаторных объектов. Диаграммы Юнга параметризуют неприводимые представления симметрической группы. Поэтому комбинаторика диаграмм Юнга тесно связана с асимптотической теорией представлений, которая изучает асимптотические свойства параметров неприводимых представлений классических групп. В 1981 г. А. М. Вершиком была поставлена задача о существовании предела нормализованных размерностей последовательности диаграмм Юнга с максимальными размерностями, которая до сих пор не решена. **Цель исследования:** построение последовательности диаграмм с большими и максимальными размерностями, соответствующих неприводимым представлениям симметрической группы. **Методы:** модификация жадного алгоритма построения последовательности диаграмм с большими размерностями, основанная на процедуре улучшения диаграммы на каждом уровне градуированного графа Юнга. **Результаты:** предлагаемый алгоритм позволяет получить все известные на данный момент диаграммы с максимальными размерностями, а также улучшить оценки на максимальные размерности в случаях, когда их точные значения неизвестны.

Ключевые слова — симметрическая группа, неприводимое представление, диаграмма Юнга, таблица Юнга, процесс Планшереля.

Введение

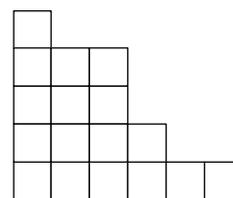
Задача поиска диаграмм Юнга, максимизирующих количество таблиц Юнга, имеет теснейшую связь с асимптотической теорией представлений. Диаграммы Юнга из n клеток параметризуют неприводимые представления симметрической группы $S(n)$. При этом размерностью неприводимого представления служит количество таблиц Юнга соответствующей диаграммы. Задача об асимптотике максимальных размерностей неприводимых представлений поставлена более тридцати лет назад [1] и не решена до сих пор.

Двумерная *диаграмма Юнга* представляет собой конечный набор клеток, расположенных в виде строк, длина которых не возрастает [2]. Диаграммы Юнга являются одним из фундаментальных комбинаторных объектов. Они дают графическое представление разбиений натуральных чисел, рассмотренных Леонардом Эйлером еще в XVIII в. Каждая диаграмма соответствует определенному разбиению натурального числа на положительные слагаемые. При этом каждый элемент разбиения равен количеству клеток в соответствующем столбце диаграммы (рис. 1).

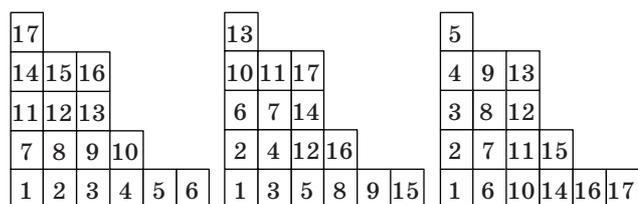
Размер диаграммы n равен количеству клеток, из которых она состоит.

Таблица Юнга — это диаграмма Юнга, клетки которой заполнены целыми числами от 1 до n . Данные числа упорядочены по возрастанию снизу вверх и слева направо (рис. 2).

Размерностью диаграммы называется количество таблиц Юнга данной диаграммы. Это же число называется *весом* соответствующего неприводимого представления. Под *максимальной диаграммой* будем понимать диаграмму, имеющую наибольшую размерность среди всех диаграмм соответствующего размера. Поскольку размерность диаграмм Юнга с ростом их размера увеличивается экспоненциально, для исследования



■ **Рис. 1.** Пример диаграммы Юнга, соответствующей разбиению $17 = 5 + 4 + 4 + 2 + 1 + 1$



■ **Рис. 2.** Три примера таблиц Юнга для диаграммы на рис. 1

размерностей диаграмм Юнга удобно использовать нормализованную размерность. Нормализованная размерность c диаграммы λ определена формулой [1]

$$c(\lambda) = \frac{-2}{\sqrt{n}} \ln \frac{\dim \lambda}{\sqrt{n!}},$$

где n — размер диаграммы; $\dim \lambda$ — размерность диаграммы.

Заметим, что чем больше размерность диаграммы, тем меньше ее нормализованная размерность.

В данной статье представлены результаты компьютерных экспериментов, позволяющие построить последовательности диаграмм с большим количеством таблиц Юнга. Это дает некоторые оценки нормализованных размерностей неприводимых представлений симметрической группы.

Постановка задачи

Рассмотрим ориентированный градуированный граф, называемый графом Юнга, вершинами которого являются диаграммы Юнга, а ребра связывают вложенные друг в друга диаграммы, отличающиеся одной клеткой. Уровнем графа Юнга называется множество вершин, соответствующее диаграммам Юнга одного размера. На рис. 3 показаны первые пять уровней графа Юнга.

Можно построить марковскую цепь на графе Юнга, определив для каждого ребра соответствующую переходную вероятность. На графе Юнга существует замечательный марковский процесс [3], который называется процессом Планшереля. Этот процесс обладает свойством центральности: вероятности любых двух различных путей,

соединяющих одинаковые диаграммы, равны между собой. Переходные вероятности для этого процесса рассчитаны по формуле

$$p(\lambda, x, y) = \prod_{i=0}^{x-1} \frac{h(\lambda, i, y)}{h(\lambda, i, y) + 1} \prod_{j=0}^{y-1} \frac{h(\lambda, x, j)}{h(\lambda, x, j) + 1},$$

где λ — диаграмма Юнга; x, y — координаты добавляемой клетки; h — длина крюка клетки. *Крюком* клетки называется сама клетка, а также клетки, расположенные в том же столбце выше и в той же строке правее. *Длина крюка* — количество клеток, из которых состоит крюк.

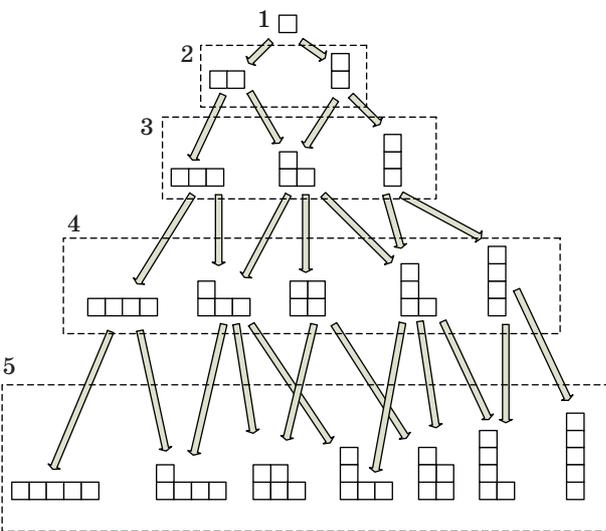
Процесс Планшереля определяет вероятностную меру на диаграммах Юнга. Мера, соответствующая центральным марковским процессам, также называется центральной. Задача об описании всех центральных мер на графе Юнга решена в статье [4].

Целью данной работы является построение последовательности диаграмм Юнга с максимальными размерностями. Для этого построения был использован тот факт, что вероятность пути из диаграммы размера 1 в диаграмму размера n прямо пропорциональна размерности диаграммы, т. е. количеству таблиц Юнга в ней. Таким образом, задача сводится к построению путей в графе Юнга с максимальными планшерелевскими вероятностями.

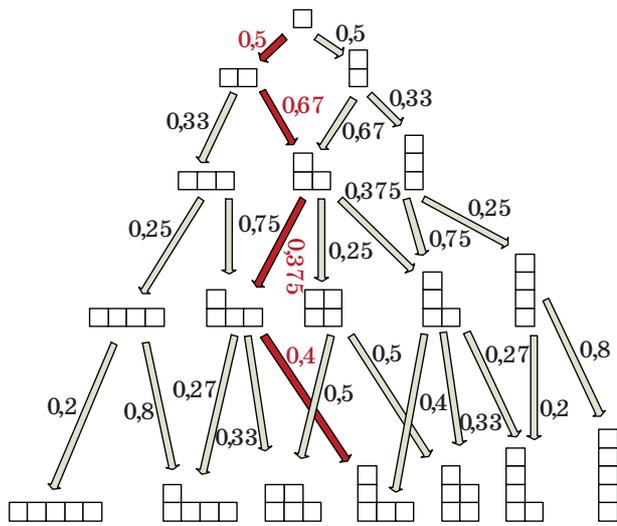
Возможный способ построения последовательности диаграмм с большими размерностями — *жадный алгоритм*¹. Данная последовательность начинается из корня графа Юнга (диаграммы размера 1). Движение осуществляется по ветвям, вероятность которых максимальна на каждом шаге (рис. 4). Для краткости будем называть ее *жадной последовательностью*. Первые 14 диаграмм жадной последовательности обладают максимально возможной размерностью, однако размерность 15-й диаграммы уже не максимальна.

Последовательность, содержащая первую 131 точную максимальную размерность, была построена [5] путем полного перебора путей в графе Юнга. В начальном отрезке жадной последовательности длиной 131 не максимальными являются 43 диаграммы. Был предложен способ улучшения жадного алгоритма, позволяющий построить все известные диаграммы с максимальными размерностями гораздо быстрее, чем в алгоритме, использующем полный перебор. Идея такого улучшения состоит в попытке на каждом шаге увеличить размерность диаграм-

¹ Жадный алгоритм был рассмотрен в неопубликованной на данный момент статье Н. Н. Васильева и А. Б. Терентьева “Irreducible representations of symmetric groups with large dimensions and modelling of Plancherel process”.



■ Рис. 3. Фрагмент графа Юнга



■ Рис. 4. Начало жадной последовательности диаграмм

мы, не увеличивая ее размера, путем изменения некоторого фиксированного количества клеток, и только после этого осуществить переход на следующий уровень, добавив клетку с максимальной размерностью. Такая стратегия позволяет очень быстро построить все известные максимальные диаграммы и так же достаточно быстро строит улучшенную последовательность, содержащую диаграммы с большими размерностями.

До сих пор не доказано, что нормализованные размерности максимальных диаграмм сходятся к пределу (гипотеза Вершика [1]). Доказательству несколько более слабой гипотезы о сходимости по вероятности нормализованных размерностей диаграмм, типичных по мере Планшереля, посвящена работа [6]. Наши компьютерные эксперименты показывают, что гипотеза о сходимости максимальных нормализованных размерностей с ростом размера диаграмм очень правдоподобна. Кроме того, можно высказать гипотезу, что асимптотика последовательности нормализованных размерностей в жадной последовательности совпадает с асимптотикой нормализованных размерностей максимальных диаграмм.

Описание алгоритма

Идея стратегии данного алгоритма — улучшение последовательности диаграмм, полученных с помощью жадного алгоритма. При этом для поиска диаграммы такого же размера, что исходная, но большей размерности, могут быть использованы разные стратегии. Один из подходов состоит в том, чтобы сначала увеличить размер диаграммы, а затем уменьшить его до исходного, получив диаграмму с лучшей размерностью.

Для этого выполняется следующая последовательность действий.

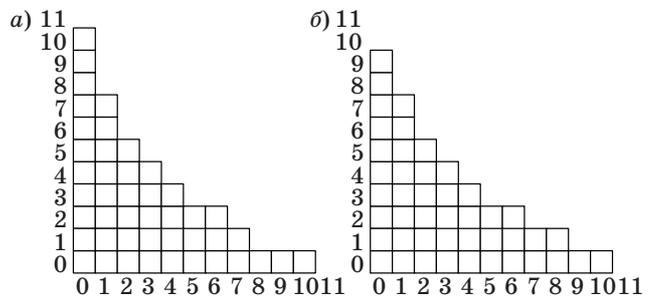
1. Осуществляется жадный рост диаграммы до размера $n+N$.

2. Из полученной диаграммы последовательно удаляется N клеток, вносящих наименьший вклад в вероятность генерации данной диаграммы. Каждый раз выбирается клетка, вероятность добавления которой к предыдущей диаграмме для получения текущей диаграммы минимальна.

Данные шаги повторяются для разных значений N . При этом в результате могут быть получены различные диаграммы. Из данных диаграмм выбирается имеющая максимальную размерность. Затем осуществляется ограниченный перебор диаграмм, отличающихся от полученной на 2 и 3 клетки. В тех случаях, когда исходная диаграмма не была максимальной, как правило, это позволяет найти диаграмму с большей размерностью.

Две диаграммы из 45 клеток получены с помощью жадного алгоритма (рис. 5, а) и предлагаемого алгоритма, использующего стратегию улучшения (рис. 5, б). В таблице приведены значения обычных и нормализованных размерностей данных диаграмм, а также разницы между этими значениями.

Заметим, что диаграмма на рис. 5, б является максимальной.



■ Рис. 5. Диаграммы Юнга размера $n = 45$, полученные с помощью жадного алгоритма (а) и предлагаемого алгоритма с улучшенной стратегией (б)

■ Значения обычной и нормализованной размерностей для двух диаграмм размера $n = 45$

Наименование	Размерность	Нормализованная размерность
Предлагаемый алгоритм	500283928761422348434320000	0,459847
Жадный алгоритм	492955458105064380984558000	0,462047
Разница	7328470656357967449762000	-0,0022

Свойства жадных последовательностей, начинающихся не с единичной диаграммы

При проведении большого количества численных экспериментов по построению жадных последовательностей, начинающихся с разных диаграмм Юнга, замечено, что любые две жадные последовательности в определенный момент сливаются в одну.

Был проведен следующий эксперимент. От различных пар диаграмм Юнга, сгенерированных случайно с помощью процесса Планшереля, строились жадные последовательности. Компьютерные эксперименты показывают, что любые две такие последовательности отличаются только начальными отрезками.

Введем отношение эквивалентности на бесконечных путях в графе Юнга, считая два пути эквивалентными, если они полностью совпадают, начиная с некоторой диаграммы. Соответствующие классы эквивалентности называются концами графа Юнга и образуют так называемую границу графа Юнга. Слияние любых двух жадных последовательностей означало бы, что все жадные последовательности, начинающиеся с любой диаграммы, определяет одну и ту же точку на границе графа Юнга, т. е. один и тот же класс эквивалентности.

Это свойство было проверено на 5000 случайно сгенерированных с помощью процесса Планшереля пар диаграмм Юнга (с начальным размером 5000 клеток). Также было проведено 20 экспериментов на диаграммах с начальным размером 1 000 000 клеток.

Отдельно были рассмотрены исключительные случаи, когда диаграммы представляли собой строку и столбец (отличались на максимально возможное количество клеток). Даже в этих случаях все построенные в компьютерных экспери-

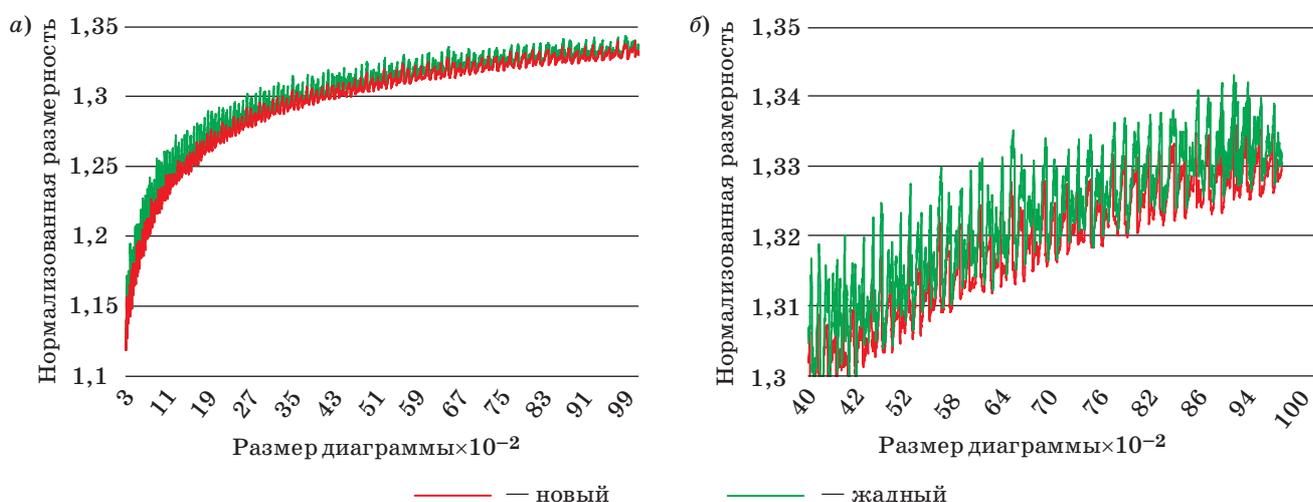
ментах последовательности также сливались. Это дает основание полагать, что асимптотика максимальных размерностей в точности равна асимптотике размерностей любой жадной последовательности.

Результаты

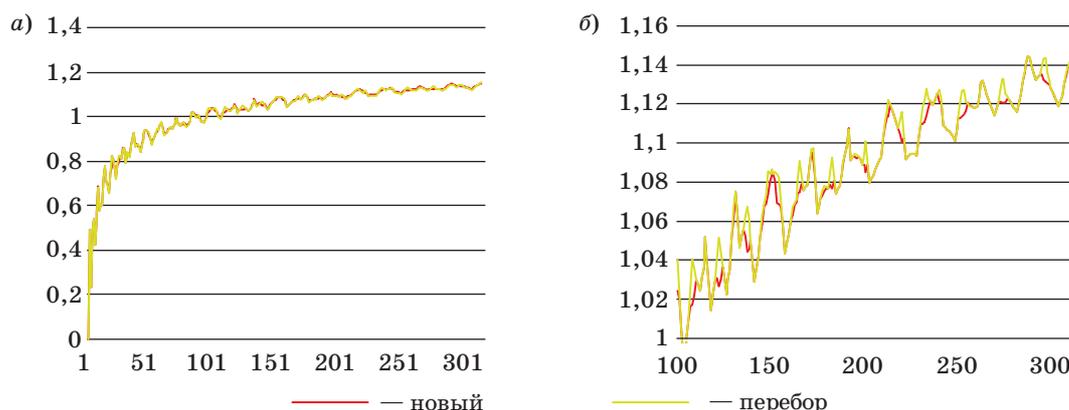
Сравнение результатов работы нового алгоритма и жадного алгоритма представлено на рис. 6, *a* и *б*. Показана зависимость нормализованной размерности от размера диаграммы. Как видно из рисунка, нормализованная размерность — сильно осциллирующая функция. Форма кривых в целом совпадает, что позволяет предположить, что в асимптотике они также имеют похожее поведение. Следует отметить, что кривая, соответствующая новому алгоритму, ни в одной точке не превышает кривую жадного алгоритма. Это говорит о том, что нормализованная размерность диаграмм, полученных с помощью нового алгоритма, меньше или равна нормализованной размерности диаграмм жадной последовательности, а реальная размерность, соответственно, больше или равна. Для первых 10 000 диаграмм новый алгоритм получает диаграммы с большей размерностью в 92 % случаев. В остальных случаях алгоритмы получают одинаковые диаграммы, в большинстве случаев эти диаграммы имеют максимальные размерности.

Аналогичное сравнение нового алгоритма и алгоритма перебора [5] в исходном и укрупненном масштабах приведено на рис. 7, *a* и *б* соответственно.

Для первых 311 диаграмм новый алгоритм получает диаграммы с большей размерностью в 33 % случаев (в остальных случаях алгоритмы получают одинаковые диаграммы).



■ Рис. 6. Нормализованные размерности жадной последовательности и последовательности нового алгоритма для диаграмм размеров 300–10 000 (*a*) и 4000–10 000 (*б*) (укрупненный масштаб)



■ **Рис. 7.** Нормализованные размерности последовательности, полученной перебором, и последовательности нового алгоритма для диаграмм размеров 1–311 (а) и 100–311 (б) (укрупненный масштаб)

Заключение

С помощью предлагаемого алгоритма была построена последовательность диаграмм с большими размерностями вплоть до диаграммы размером 10 000 клеток. Все известные диаграммы с максимальными размерностями присутствуют в данной последовательности. Представленный алгоритм улучшает 92 % из первых десяти тысяч диаграмм, полученных жадным алгоритмом,

и 33 % из первых 311 диаграмм, полученных с помощью перебора, что позволяет высказать гипотезу о том, что бесконечная последовательность, построенная с помощью этого алгоритма, содержит бесконечное же количество максимальных диаграмм. Таким образом, компьютерные эксперименты, описанные в настоящей статье, дают дополнительные основания предполагать справедливость гипотез, высказанных А. М. Вершиком [1].

Литература

1. **Вершик А. М., Керов С. В.** Асимптотика максимальной и типичной размерностей неприводимых представлений симметрической группы // *Функциональный анализ и его приложения*. 1985. Т. 19. № 1. С. 25–36.
2. **William Fulton.** *Young Diagrams, with Applications to Representation Theory and Geometry*. — Cambridge University Press, 1996. — 272 p.
3. **Вершик А. М., Керов С. В.** Асимптотика меры Планшереля симметрической группы и предельная форма таблиц Юнга // *Докл. Академии наук СССР*. 1977. Т. 233. № 6. С. 1024–1027.
4. **Вершик А. М., Керов С. В.** Асимптотическая теория характеров симметрической группы // *Функциональный анализ и его приложения*. 1981. Т. 15. № 4. С. 15–27.
5. **Вершик А. М., Павлов Д. А.** Численные эксперименты в задачах асимптотической теории представлений // *Записки научных семинаров ПОМИ*. 2009. Т. 373. С. 77–93.
6. **Буфетов А. И.** Решение гипотезы Вершика — Керова об энтропии меры Планшереля // *Успехи математических наук*. 2010. Т. 65. № 1(391). С. 181–182.

UDC 517.987

doi:10.15217/issn1684-8853.2015.3.17

Building Irreducible Representations of a Symmetric Group $S(n)$ with Large and Maximum Dimensions

Vasilyev N. N.^a, PhD, Phys.-Math., Senior Research Fellow, vasilyev@pdmi.ras.ru

Duzhin V. S.^a, Researcher, vduzhin@gmail.com

^aSaint-Petersburg Department of V. A. Steklov Institute of Mathematics of RAS, Saint-Petersburg, 27, Fontanka, 191023, Russian Federation

Introduction: In combinatorics, Young diagrams and Young tableaux are important mathematical objects. Asymptotic combinatorics studies the asymptotic behaviour of parameters of combinatorial objects. Young diagrams parameterize irreducible representations of a

symmetric group. Therefore, the combinatorics of Young diagrams is closely related to asymptotic representation theory which studies the asymptotic properties of parameters of irreducible representations for classical groups. In 1981, A. M. Vershik posed a problem about the convergence of normalized maximal dimensions of Young diagrams. This problem still remains open. **Purpose:** Building a sequence of diagrams of large and maximum dimensions which would correspond to irreducible representations of a symmetric group. **Methods:** We propose a modification of the greedy algorithm which builds a sequence of diagrams with large dimensions. The idea is to enhance the diagram on each level of the graded Young graph. **Results:** With the proposed algorithm, you can obtain all the maximum dimension diagrams known for today, and also improve some of the existing estimations for the maximum dimensions of Young diagrams for the cases when their exact values are unknown.

Keywords — Symmetric Group, Irreducible Representation, Young Diagram, Young Tableau, Plancherel Process.

References

1. Vershik A. M., Kerov S. V. Asymptotics of Maximal and Typical Dimensions of Irreducible Representations of a Symmetric Group. *Funktsional'nyi analiz i ego prilozheniia*, 1985, vol. 19, no. 1, pp. 25–36 (In Russian).
2. William Fulton. *Young Diagrams, with Applications to Representation Theory and Geometry*. Cambridge University Press, 1996. 272 p.
3. Vershik A. M., Kerov S. V. Asymptotics of the Plancherel Measure of the Symmetric Group and the Limiting form of Young Tableaux. *Doklady Akademii nauk SSSR*, 1977, vol. 233, no. 6, pp. 1024–1027 (In Russian).
4. Vershik A. M., Kerov S. V. Asymptotic Theory of Characters of the Symmetric Group. *Funktsional'nyi analiz i ego prilozheniia*, 1981, vol. 15, no. 4, pp. 15–27 (In Russian).
5. Vershik A. M., Pavlov D. Numerical Experiments in the Problems of Asymptotic Representation Theory. *Zapiski nauchnykh seminarov POMI*, 2009, vol. 373, pp. 77–93 (In Russian).
6. Bufetov A. I. On the Vershik—Kerov Conjecture Concerning the Entropy of the Plancherel Measure. *Uspekhi matematicheskikh nauk*, 2010, vol. 65, no. 1(391), pp. 181–182 (In Russian).

УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

Научные базы данных, включая SCOPUS и Web of Science, обрабатывают данные автоматически. С одной стороны, это ускоряет процесс обработки данных, с другой — различия в транслитерации ФИО, неточные данные о месте работы, области научного знания и т. д. приводят к тому, что в базах оказывается несколько авторских страниц для одного и того же человека. В результате для всех по отдельности считаются индексы цитирования, снижая рейтинг ученого.

Для идентификации авторов в сетях Thomson Reuters проводит регистрацию с присвоением уникального индекса (ID) для каждого из авторов научных публикаций.

Процедура получения ID бесплатна и очень проста: входите на страницу <http://www.researcherid.com>, слева под надписью «New to ResearcherID?» нажимаете на синюю кнопку «Join Now It's Free» и заполняете короткую анкету. По указанному электронному адресу получаете сообщение с предложением по ссылке заполнить полную регистрационную форму на ORCID. Получаете ID.

УДК 519.17

doi:10.15217/issn1684-8853.2015.3.23

ЗАВИСИМОСТЬ МЕЖДУ ПЕСОЧНОЙ ГРУППОЙ ГРАФА И ЕГО МАТРОИДОМ

И. А. Крепкий^{а, 1}, аспирант^аСанкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, РФ

Постановка проблемы: определение структуры песочных групп графов представляет собой сложную вычислительную задачу. В попытке снизить сложность решения данной задачи для некоторых классов графов была обнаружена зависимость между песочной группой графа и его матроидом: структура песочной группы графа зависит только от его матроида. Целью статьи является доказательство данного утверждения. **Методы:** для доказательства изоморфности песочных групп 2-изоморфных графов были использованы элементарные операции с матрицами Лапласа этих графов. Основной результат статьи получен как следствие теоремы Уитни о 2-изоморфных графах. **Результаты:** доказано, что структура песочной группы графа полностью определяется структурой матроида этого графа.

Ключевые слова — песочные группы, графы, матроиды, нормальная форма Смита, 2-изоморфные графы.

Введение

Конструкция песочной группы впервые появилась в виде частного случая, описанного под названием VTW-модель Пером Баком, Чао Тангом и Куртом Вейзенфельдом [1]. Основной мотивацией для создания этой модели была попытка демонстрации и объяснения эффекта самоорганизованной критичности, возникающего в различных естественных процессах, таких как землетрясения, эпидемии, лесные пожары и т. д. Указанную модель обобщил Дипак Дхар [2], что и привело к появлению понятия песочной группы графа.

Песочная группа связанного графа представляет собой подмножество множества так называемых редуцированных песочных куч графа (песочная куча — отображение из множества вершин графа в множество неотрицательных чисел), снабженным операцией сложения куч (сложение — поточечное суммирование песочных куч с последующим редуцированием результата при помощи процедуры, определяемой конструкцией графа). В песочную группу входят только так называемые рекуррентные песочные кучи, удовлетворяющие *burning test* [3]. Структурно песочная группа графа представляет собой конечную абелеву группу.

Песочные группы обладают серией интересных свойств. Так, например, из матричной теоремы о деревьях [4] следует, что порядок песочной группы графа равен количеству его остовных деревьев. Явная биекция между элементами песочной груп-

пы и остовными деревьями была сконструирована в работе [5]. Также известно, что песочная группа связанного планарного графа изоморфна песочной группе графа, дуального данному [6].

Песочные группы графов нередко упоминаются в довольно неожиданных контекстах. Так, например, в работе [7] граф рассматривается как дискретный аналог римановой поверхности и доказан аналог теоремы Римана — Роха. Если в классической теореме Римана — Роха дивизорами являются целочисленные линейные комбинации точек римановой поверхности, то в дискретном аналоге роль дивизоров играют элементы песочной группы графа. Также о связи песочных групп с алгебраической геометрией см. в работе [8].

Иногда совершенно неожиданно обнаруживаются изоморфизмы каких-либо серий групп с песочными группами определенных серий графов. Например, группы, изоморфные песочным группам, возникают в связи с вопросами замощения прямоугольной доски фигурами домино [9]. В работе [10] была установлена связь между некоторыми группами действий на множествах непериодических двухцветных ожерелий и песочными группами графов де Бройна.

Основной целью данной статьи является установление взаимосвязи между структурой песочных групп графов и структурой матроидов этих графов.

Определения

Будем считать, что две квадратные целочисленные матрицы эквивалентны, если одна из них может быть получена из другой применением конечного числа операций прибавления/вычитания одного столбца/строки к другому.

¹ Научный руководитель — старший научный сотрудник лаборатории теории представлений и динамических систем Санкт-Петербургского отделения Математического института им. В. А. Стеклова РАН Н. Н. Васильев.

Определение 1. Любая квадратная целочисленная матрица M эквивалентна матрице M' вида

$$\begin{bmatrix} f_1 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & f_2 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & f_r & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix},$$

где $f_k | f_{k+1}$, $1 \leq k \leq r-1$. Матрица M' называется нормальной формой Смита матрицы M [11].

Пусть M — квадратная целочисленная матрица. Будем обозначать как \bar{M} мультимножество диагональных элементов нормальной формы Смита матрицы M .

Определение 2. Пусть n вершин мультиграфа G пронумерованы от 1 до n . Пусть M — квадратная матрица размера $n \times n$, устроенная следующим образом: элемент матрицы $m_{(i,j)}$ равен $-\text{deg}(v_i)$ при $i = j$, если же $i \neq j$, то элемент равен количеству ребер, соединяющих вершины i и j . Матрица M называется матрицей Лапласа графа G .

Мы будем использовать (как в работе [12]) определение песочной группы мультиграфа, построенное в терминах нормальной формы Смита матрицы Лапласа этого графа.

Определение 3. Песочная группа мультиграфа G — это группа $S(G) \cong \bigoplus_{a \in (\bar{M} \setminus \{0\})} C_a$, где M — матрица

Лапласа мультиграфа G .

Операции с графами и песочные группы

Пусть P и Q — некоторые мультиграфы и $p \in V(P)$, $q \in V(Q)$. Пусть мультиграф \hat{F} получен из P и Q через соединение ребром e вершин p и q , а мультиграф F получен из \hat{F} стягиванием ребра pq . В таком случае будем говорить, что F получен из P и Q при помощи склеивания вершин p и q . Точно так же если $p \in P$, $q \in P$, мы можем построить новое ребро pq и стянуть его, говоря, что полученный мультиграф построен при помощи склеивания вершин p и q . В работе [13] данную операцию называют «vertex identification». Обратную ей операцию (т. е. нарушение связности графа F при помощи единичного разрезания в некоторой вершине на графы P и Q) называют «vertex splitting».

Пусть теперь P — мультиграф, состоящий из $p+2$ вершин, пронумерованных от 1 до $p+2$, где $p \geq 0$.

Пусть Q — мультиграф, состоящий из $q+2$ вершин, пронумерованных от 1 до $q+2$, где $q \geq 0$.

Пусть $F_+(P,Q)$ получен через склеивание $(p+1)$ -й вершины P с 1-й вершиной Q и склеивание $(p+2)$ -й вершины P со 2-й вершиной Q .

Пусть $F_-(P,Q)$ получен через склеивание $(p+1)$ -й вершины P со 2-й вершиной Q и склеивание $(p+2)$ -й вершины P с 1-й вершиной Q .

Говорят [13], что граф $F_+(P,Q)$ получен из $F_-(P,Q)$ при помощи операции «twisting».

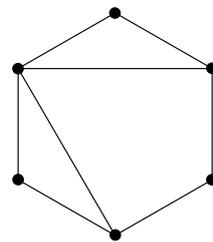
Теорема 1. $S(F_+(P,Q)) \cong S(F_-(P,Q))$.

Пример. На рис. 1 и 2 изображены произвольно выбранные связные графы. Выбор пары вершин на каждом из этих графов дает нам конструкции соответствующих графов $F_+(P,Q)$ и $F_-(P,Q)$ (рис. 3 и 4). Здесь $S(F_+(P,Q)) \cong C_3 * C_{420} \cong S(F_-(P,Q))$.

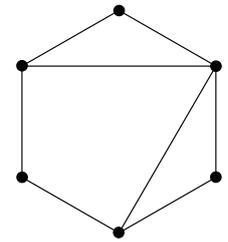
Доказательство: достаточно показать, что матрицы Лапласа мультиграфов F_+ и F_- эквивалентны в том смысле, что имеют общую нормальную форму Смита.

Пусть матрицы Лапласа мультиграфов P и Q выглядят следующим образом:

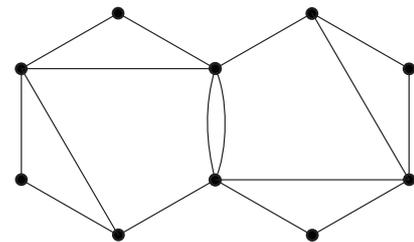
$$\begin{bmatrix} \hat{P} & \begin{matrix} a_1 & b_1 \\ \vdots & \vdots \\ a_p & b_p \end{matrix} \\ a_1 \dots a_p & \begin{matrix} -A & X \\ X & -B \end{matrix} \end{bmatrix}; \begin{bmatrix} \begin{matrix} -C & Y & c_1 & \dots & c_q \\ Y & -D & d_1 & \dots & d_q \\ c_1 & d_1 & & & \\ \vdots & \vdots & & & \hat{Q} \\ c_q & d_q & & & \end{matrix} \end{bmatrix},$$



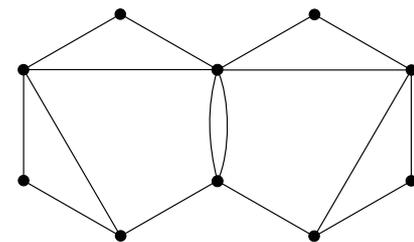
■ Рис. 1. Граф P



■ Рис. 2. Граф Q



■ Рис. 3. Граф $F_+(P,Q)$



■ Рис. 4. Граф $F_-(P,Q)$

Мы получили матрицу, равную матрице F'_+ , т. е. F'_+ и F'_- эквивалентны, что равносильно $S(F'_+(P, Q)) \cong S(F'_-(P, Q))$, ч. т. д.

Кроме того, в работах [14, 15] были доказаны еще две теоремы подобного рода. Пусть $p \in V(P)$ и $q \in V(Q)$, где P и Q — какие-то мультиграфы. Мультиграф $X(P, Q)$ получен посредством склеивания вершин p и q . Тогда справедлива следующая теорема.

Теорема 2. Структура $S(X(P, Q))$ не зависит от выбора вершин p и q . Кроме того, $S(X(P, Q)) \cong S(P) * S(Q)$ [14].

Так, например, песочная группа каждого из трех графов, изображенных на рис. 5, изоморфна $(C_3)^7$, так как песочная группа циклического графа из трех вершин изоморфна C_3 .

Для формулировки третьей теоремы определим конструкцию мультиграфа H_i . Пусть F и G — некоторые мультиграфы. Пусть f_1 и f_2 — неотрицательные целочисленные функции на множестве вершин F , а g_1 и g_2 — неотрицательные целочисленные функции на множестве вершин G . Обозначим как T циклический мультиграф, состоящий из n вершин. Пронумеруем вершины этих трех мультиграфов натуральными числами:

- 1) r вершин F пронумерованы от 1 до r ;
- 2) n вершин T пронумерованы от $r + 1$ до $r + n$ в порядке их следования в цикле;
- 3) s вершин G пронумерованы от $r + n + 1$ до $r + n + s$.

Теперь для $i \in Z, 0 \leq i \leq n - 2$ построим мультиграф H_i .

1. Соединим каждую вершину v мультиграфа G с $(r + n - 1)$ -й вершиной мультиграфа T при помощи $g_1(v)$ ребер.

2. Соединим каждую вершину v мультиграфа G с $(r + n)$ -й вершиной мультиграфа T при помощи $g_2(v)$ ребер.

3. Соединим каждую вершину v мультиграфа F с $(r + i)$ -й вершиной мультиграфа T при помощи $f_1(v)$ ребер (если $1 \leq i \leq n - 2$) или же соединим каждую вершину v мультиграфа F с $(r + n)$ -й вершиной мультиграфа T при помощи $f_1(v)$ ребер (если $i = 0$).

4. Соединим каждую вершину v мультиграфа F с $(r + i + 1)$ -й вершиной мультиграфа T при помощи $f_2(v)$ ребер.

Теорема 3. Структура $S(H_i)$ не зависит от выбора i [15].

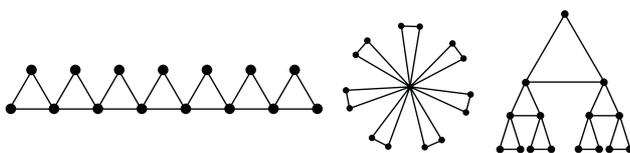


Рис. 5. Графы с песочными группами, изоморфными $(C_3)^7$

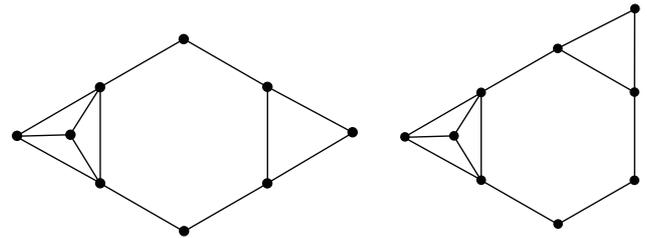


Рис. 6. Графы с песочными группами, изоморфными C_{248}

Так, например, на рис. 6 изображены графы H_1 и H_2 , для которых F — полный граф на двух вершинах, G — полный граф на одной вершине (вершина без ребер), а T — 6-цикл. Песочные группы обоих графов изоморфны C_{248} .

Связь матроида графа с его песочной группой

Определение 4. Если граф G изоморфен некоторому графу, полученному из графа H через последовательность операций vertex identification, vertex splitting, twisting, то графы G и H называют 2-изоморфными [13].

В теореме 1 графы F_+ и F_- — это в точности такие графы, один из которых получен из другого при помощи операции twisting. Напротив, если какой-то связный граф построен из другого при помощи данной операции, то конструкции этих графов можно описать как $F_+(P, Q)$ и $F_-(P, Q)$ для каких-то P и Q .

В теореме 2 речь идет о графе $X(P, Q)$, конструкция которого зависит от выбора одной вершины на графе P и одной вершины на графе Q . Каждый из графов $X(P, Q)$ может быть получен из любого другого такого графа при помощи последовательного применения операций vertex splitting и vertex identification. И, напротив, если какой-то связный граф получен из другого связного графа при помощи данных операций, то конструкции обоих графов можно описать как $X(P, Q)$ для каких-то P и Q . Соответственно, из теорем 1 и 2 следует **лемма**. Если связные графы G и H 2-изоморфны, то $S(G) \cong S(H)$.

Определение 5. Матроидом называется пара (X, I) , где X — конечное множество, называемое носителем матроида, а I — некоторое множество подмножеств X , называемое семейством независимых множеств. При этом должны выполняться следующие условия:

- 1) $\emptyset \in I$;
- 2) если $A \in I$ и $B \subset A$, то $B \in I$;
- 3) если $A, B \in I$ и $|A| > |B|$, то существует $x \in A \setminus B$ такой, что $B \cup \{x\} \in I$.

Определение 6. Матроидом графа G называют матроид M_G , чье базовое множество — $V(G)$ — мно-

жество ребер графа G , а независимым множеством является лес, образованный какими-то из ребер множества $V(G)$ [13].

Изоморфность матроидов двух графов G и H без изолированных вершин влечет их 2-изоморфность. Этот факт составляет содержание следующей теоремы.

Теорема Уитни. Графы G и H без изолированных вершин 2-изоморфны тогда и только тогда, когда их матроиды M_G и M_H изоморфны [13].

Отсюда и из леммы сразу же следует теорема.

Теорема 4. Если для каких-то связных графов G и H их матроиды M_G и M_H изоморфны, то $S(G) \cong S(H)$.

Заключение

В данной работе были представлены теоремы о некоторых операциях над графами, сохраняющих структуру их песочных групп. Доказанные теоремы позволили получить в качестве следствия основной результат работы — утверждение

о том, что структура песочной группы графа зависит только от структуры матроида этого графа.

Стоит отметить, что операции H_i из теоремы 3 сохраняют структуру песочной группы графа, но не структуру его матроида. Существуют ли другие элементарные операции, обладающие подобным свойством и не являющиеся композицией операций, уже указанных в работе, автору на данный момент неизвестно.

Благодарности

Автор выражает благодарность доктору физико-математических наук Сергею Васильевичу Дужину за научное руководство и череду интересных бесед, благодаря которым стало возможно написание данной статьи.

Автор также благодарит кандидата физико-математических наук Николая Николаевича Васильева за продолжение научного руководства, советы и замечания, которые помогли завершить работу.

Литература

1. Bak P., Tang C., Wiesenfeld K. Self-organized Criticality: an Explanation of $1/f$ noise// Physical Review Letters. 1987. N 59(4). P. 381–384.
2. Dhar D. Self-organized Critical State of Sandpile Automaton Models// Physical Review Letters. 1990. N 64(14). P. 1613–1616.
3. Pietronero L., Tartaglia P., Zhang Y. Theoretical Studies of Self-Organized Criticality. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. 1991. N 173(1). P. 22–44.
4. Kirchhoff G. Über die Auflösung der Gleichungen, auf welche man bei der untersuchung der linearen verteilung galvanischer Ströme geführt wird// Archives of Chemistry and Physics. 1847. N 72. P. 497–508.
5. Bernardi Olivier. Tutte Polynomial, Subgraphs, Orientations and Sandpile Model: New Connections via Embeddings//The Electronic Journal of Combinatorics. 2008. N 15(1). P. 109.
6. Cori Robert, Rossin Dominique. On the Sandpile Group of Dual Graphs//European Journal of Combinatorics. 2000. N 21(4). P. 447–459.
7. Baker M., Norine S. Riemann–Roch and Abel–Jacobi Theory on a Finite Graph//Advances in Mathematics. 2007. N 215(2). P. 766–788.
8. Perkinson David, Perlman Jacob, Wilmes John. Primer for the Algebraic Geometry of Sandpiles, Tropical and non-Archimedean Geometry//Contemporary Mathematics. 2013. N 605. P. 211–256.
9. Florescu Laura, Morar Daniela, Perkinson David, Salter Nick, Xu Tianyuan. Sandpiles and Dominos. <http://arxiv.org/abs/1406.0100> (дата обращения: 21.05.2015).
10. Duzhin S., Pasechnik D. Automorphisms of Necklaces and Sandpile Groups. <http://arxiv.org/abs/1304.2563> (дата обращения: 21.05.2015).
11. Matthews K. R. Smith Normal Form. <http://www.numbertheory.org/courses/MP274/smith.pdf> (дата обращения: 21.05.2015).
12. Крепкий И. А. Песочные группы треугольных бинарных деревьев. <http://www.pdmi.ras.ru/preprint/2012/12-21.html> (дата обращения: 21.05.2015).
13. Theory of Matroids/ Ed. by N. White. — Cambridge University Press, 1986. XVII. — 316 p. (Ser. Encyclopedia of Mathematics and its Application. Vol. 26).
14. Крепкий И. А. Склеивание графов и песочные группы//Записки научных семинаров ПОМИ. 2013. Т. 411. С. 119–124.
15. Крепкий И. А. The Sandpile Groups of Chain-Cyclic Graphs//Записки научных семинаров ПОМИ. 2014. Т. 421. С. 94–112.

UDC 519.17

doi:10.15217/issn1684-8853.2015.3.23

Relation between the Sandpile Group of a Graph and its MatroidKrepkiy I. A.^a, Post-Graduate Student, feb418@gmail.com^aSaint-Petersburg State University, Saint-Petersburg, 7-9, Universitetskaya nab., Saint-Petersburg, 199034, Russian Federation

Purpose: Determining the structure of sandpile groups of graphs is a complex computational problem. When trying to reduce its solution complexity for some classes of graphs, a strong correspondence was found between the sandpile group of a graph and its matroid. Namely, the structure of the sandpile group depends only on the matroid. The purpose of this article is proving this statement. **Methods:** In order to prove that a 2-isomorphic graph has isomorphic sandpile groups, some elementary operations were used with Laplacian matrices of such a graph. The main result of the work was obtained as a corollary of Whitney's theorem about 2-isomorphic graphs. **Results:** It has been proved that the structure of the sandpile group of a graph is completely determined by the structure of its matroid.

Keywords — Sandpile Groups, Graphs, Matroids, Smith Normal Form, 2-Isomorphic Graphs.

References

1. Bak P., Tang C., Wiesenfeld K. Self-organized Criticality: an Explanation of $1/f$ noise. *Physical Review Letters*, 1987, no. 59(4), pp. 381–384.
2. Dhar D. Self-organized Critical State of Sandpile Automaton Models. *Physical Review Letters*, 1990, no. 64(14), pp. 1613–1616.
3. Pietronero L., Tartaglia P., Zhang Y. Theoretical Studies of Self-Organized Criticality. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 1991, no. 173(1), pp. 22–44.
4. Kirchhoff G. Über die Auflösung der Gleichungen, auf welche man bei der untersuchung der linearen verteilung galvanischer Ströme geführt wird. *Archives of Chemistry and Physics*, 1847, no. 72, pp. 497–508 (In German).
5. Bernardi Olivier. Tutte Polynomial, Subgraphs, Orientations and Sandpile Model: New Connections via Embeddings. *The Electronic Journal of Combinatorics*, 2008, no. 15(1), p. 109.
6. Cori Robert, Rossin Dominique. On the Sandpile Group of Dual Graphs. *European Journal of Combinatorics*, 2000, no. 21(4), pp. 447–459.
7. Baker M., Norine S. Riemann—Roch and Abel—Jacobi Theory on a Finite Graph. *Advances in Mathematics*, 2007, no. 215(2), pp. 766–788.
8. Perkinson David, Perlman Jacob, Wilmes John. Primer for the Algebraic Geometry of Sandpiles, Tropical and non-Archimedean Geometry. *Contemporary Mathematics*, 2013, no. 605, pp. 211–256.
9. Florescu Laura, Morar Daniela, Perkinson David, Salter Nick, Xu Tianyuan. *Sandpiles and Dominos*. Available at: <http://arxiv.org/abs/1406.0100> (accessed 21 May 2015).
10. Duzhin S., Pasechnik D. *Automorphisms of Necklaces and Sandpile Groups*. Available at: <http://arxiv.org/abs/1304.2563> (accessed 21 May 2015).
11. Matthews K. R. *Smith Normal Form*. Available at: <http://www.numbertheory.org/courses/MP274/smith.pdf> (accessed 21 May 2015).
12. Krepkiy I. A. *Sandpile Groups of Triangular Binary Trees*. Available at: <http://www.pdmi.ras.ru/preprint/2012/12-21.html> (accessed 21 May 2015).
13. White N. (ed.). *Theory of Matroids*. Cambridge University Press, 1986. XVII. 316 p. (Ser. Encyclopedia of Mathematics and its Application, vol. 26).
14. Krepkiy I. A. Sandpile Groups and the Join of Graphs. *Zapiski nauchnykh seminarov POMI*, 2013, vol. 411, pp. 119–124 (In Russian).
15. Krepkiy I. A. The Sandpile Groups of Chain-Cyclic Graphs. *Zapiski nauchnykh seminarov POMI*, 2014, vol. 421, pp. 94–112.

СЕГМЕНТАЦИЯ ИСХОДНЫХ СНИМКОВ ДЛЯ ФОТОМЕТРИЧЕСКОГО МЕТОДА ТРЕХМЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ

В. А. Кузнецов^{а, 1}, ассистент

^аСанкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,
Санкт-Петербург, РФ

Постановка проблемы: прежде чем осуществлять вычисления градиента поверхности на основе ее снимков при различном положении источников света, необходимо исключить возможность ситуации, не соответствующей модели, используемой в методе вычисления. Наиболее эффективный путь, не требующий какой-либо предварительной обработки объекта, заключается в сегментации исходных снимков. Целью работы является определение и систематизация признаков затенений, бликов и переотражений; разработка алгоритма сегментации исходных снимков с учетом специфики фотометрического метода сканирования. **Методы:** экспериментальные данные получены при компьютерном моделировании исходных изображений с использованием модели отражения Фонга. Для сегментации изображений используются признаки бликов и затенений, основывающиеся на проверке линейной зависимости интенсивностей снимков, находящихся в одной плоскости, и минимизации функции отклонения исходных данных от данных, соответствующих используемой модели. **Результаты:** определена конфигурация фотометрического трехмерного сканера из пяти фиксированных источников света, позволяющая использовать дополнительные признаки при сегментации затенений, бликов и переотражений. За счет избыточного количества снимков гарантируется наличие как минимум трех измерений яркости в каждой точке объекта, удовлетворяющих условиям проверки. Разработан алгоритм для проверки соответствия исходных данных и модели отражения света поверхностью, используемой для вычисления, в котором для большинства видимых точек задача минимизации функции от двух переменных не требует решения или была сведена к задаче минимизации функции от одной переменной. Представлен результат сегментации для двух фигур, на одной из которых смоделированы затенения, блики и разрыв поверхности, которые часто являются трудностями для вычисления ориентации поверхности. **Практическая значимость:** в сравнении с аналогами разработанный алгоритм сокращает время, необходимое для сегментации всей видимой области, а также осуществляет более детальную сегментацию исходных снимков.

Ключевые слова — трехмерное сканирование, фотометрия, сегментация затенений, зеркальное отражение.

Введение

Для фотометрического метода трехмерного сканирования вычисление градиента поверхности может производиться на основе как эмпирической модели отражения света поверхностью [1–4], так и аналитической модели [5–9].

Аналитический метод [5–7] основывается на совместном решении трех уравнений для различных положений источников света:

$$E = K(\mathbf{L} \cdot \mathbf{n}) = I_{\text{пад}} K \cos \theta, \quad (1)$$

где E — интенсивность отраженного света; \mathbf{L} — вектор освещения; \mathbf{n} — вектор нормали к поверхности; $I_{\text{пад}}$ — интенсивность падающего света; θ — угол между нормалью и вектором освещения. Решение системы уравнений позволяет определить градиент поверхности p , q и коэффициент отражения K для диффузно отражающих поверхностей без необходимости проводить калибровку на объекте идентичного материала. Такой подход

¹ Научный руководитель — профессор кафедры информационно-сетевых технологий Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, доктор технических наук Н. Н. Красильников.

дает больше возможностей для анализа погрешностей вычисления ориентации поверхности, так как вычисления выполняются непосредственно на основании измеренных значений яркости.

Необходимость выполнять сегментацию бликов и затенений вызвана тем, что для аналитической модели освещения вычисление ориентации поверхности в точках, не соответствующих закону отражения света поверхностью, не имеет смысла. Для эмпирической модели освещения это проявляется в отсутствии набора интенсивностей на эталонном объекте. Помимо отбрасывания данных, аналитическая модель позволяет подобрать набор p , q , K , в наибольшей степени соответствующий и модели отражения, и исходным данным; для эмпирической модели выбор ближайшего набора может привести к значительным ошибкам. Необходимость сегментации обусловлена также высоким уровнем шума в затененных и близких к затененным областях [7], даже если затененный снимок может быть исключен.

В работах [9, 10] сегментация бликов и затенений осуществляется с использованием спектрального анализа света, для снимков в режиме grayscale сегментация недостаточно надежна,

в случае отклонения от аналитической модели выбирается наиболее яркий или наиболее темный пиксель [9]. Метод сегментации [11] требует значительного количества времени на решение задачи минимизации и позволяет определить только затенения на исходных снимках. Выбранная для работы конфигурация освещения [5–7] позволяет использовать дополнительные признаки для более подробной сегментации.

Определение отклонений от закона диффузного отражения

Исходными данными для алгоритма сегментации является набор снимков $I_0, I_1, I_1^1, I_2, I_2^1$, в которых рассматриваются точки, принадлежащие сканируемому объекту. Конфигурация из пяти источников света [5–7] позволяет осуществлять проверку по каждой оси на наличие отхождений от диффузной модели отражения. Три снимка I_0, I_1, I_1^1 или I_0, I_2, I_2^1 в случае отсутствия затенений должны быть линейно зависимы, исходя из трех уравнений (1) можно выразить одно из изображений через два других:

$$I_1 + I_1^1 = 2 \cos \xi I_0.$$

При наличии шума и возможных слабых вторичных источниках света для того, чтобы осуществлять проверку, необходимо ввести пороговую величину $\bar{D}_{\text{пор}}$:

$$i_1(x, y) + i_1^1(x, y) - 2 \cos \xi i_0(x, y) < \bar{D}_{\text{пор}}. \quad (2)$$

Выполнение неравенства будет означать, что в точке нет никаких отклонений от закона диффузного отражения света. В противном случае на снимках может присутствовать затенение, блик (возможна не только диффузная составляющая) или точка будет освещена вторичным источником света. Обозначим маску D_x (и D_y аналогично D_x)

$$\begin{cases} d_x(x, y) = 1, & \left| i_1(x, y) + i_1^1(x, y) - 2 \cos \xi i_0(x, y) \right| < \bar{D}_{\text{пор}} + \max(\bar{I}_c) \\ d_x(x, y) = 0, & \left| i_1(x, y) + i_1^1(x, y) - 2 \cos \xi i_0(x, y) \right| \geq \bar{D}_{\text{пор}} + \max(\bar{I}_c) \end{cases}.$$

Случайная шумовая составляющая \bar{I}_c для всех точек одинакова и имеет среднеквадратичное отклонение $2\sigma_I(\cos \xi + 1)$. Для конфигурации из четырех источников света должно выполняться равенство $I_1 + I_1^1 = I_2 + I_2^1$, что не позволяет определить отхождение от закона диффузного отражения света для каждой оси, т. е. вместо двух матриц D_x и D_y возможно определение только $D_x \mid D_y$, за исключением бликов и переотражений на дополнительном снимке.

Результат проверки для сферы представлен при наличии только затенений и флуктуационного шума (рис. 1, а–в), т. е. точки, где $d_x = 0$ или $d_y = 0$, будут принадлежать затенениям на исходных снимках. Заметно, что в отмеченную область попадают также точки с низким K , граница тени не четкая. Чтобы этого избежать, можно подобрать оптимальное значение $\bar{D}_{\text{пор}}$ для условий, в которых происходит сканирование, но в этом случае эффективность определения переотражений снизится.

Более надежные результаты определения D_x и D_y можно получить, учитывая тот факт, что затенение, блик и переотражение проявляются в группе отчетов, расположенных рядом. Таким образом, обозначив величины

$$\begin{aligned} \Delta(x, y) &= \left| i_1(x, y) + i_1^1(x, y) - 2 \cos \xi i_0(x, y) \right|; \\ d_R(x, y) &= \left| \Delta(x, y) + 0,5(\Delta(x-1, y) + \Delta(x+1, y) + \Delta(x, y-1) + \Delta(x, y+1)) \right|, \end{aligned}$$

сформулируем новое условие проверки

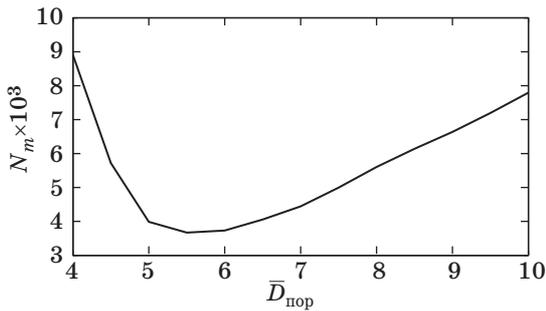
$$\begin{cases} d_x(x, y) = 1, & d_R(x, y) < 3\bar{D}_{\text{пор}} + 3\max(\bar{I}_c); \\ d_x(x, y) = 0 & \text{в противном случае,} \end{cases} \quad (3)$$

которое учитывает наличие затенений в соседних точках. Это позволяет значительно снизить количество ложных определений d_x , например в области низких K на рис. 1. Под неверным определением d_x подразумевается как ложное определение затенения, блика или переотражения, так и их пропуск.

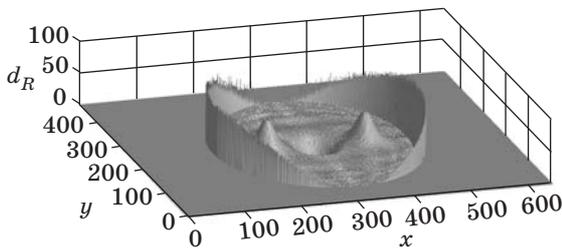
Для диффузно отражающей поверхности сферы при $\varphi_S = 30^\circ$, $\sigma_I^2 = 2,08$ и размере изображе-



■ Рис. 1. Области D_x (а); D_y (б); $S = S_{I_1} \mid S_{I_1^1} \mid S_{I_2} \mid S_{I_2^1}$ (в) при $\varphi_S = 30^\circ$, $\sigma_I^2 = 2,08$ и $\bar{D}_{\text{пор}} = 12,5$



■ **Рис. 2.** Количество неверных определений d_x в зависимости от $\bar{D}_{\text{пор}}$ для сферы при $\varphi_S = 30^\circ$, $\sigma_I^2 = 2,08$. Модель Фонга



■ **Рис. 3.** d_R для сферы при $\varphi_S = 30^\circ$, без флуктуационного шума. Модель Фонга

ния 640×480 (см. рис. 1) общее количество точек, принадлежащих затенениям, $S_x = 12\,868$, минимальное количество неверных определений d_x $N_m = 2440$ при оптимальном значении $\bar{D}_{\text{пор}} = 7$. Общее количество точек, принадлежащих затенениям и бликам, для этой же поверхности, но имеющей зеркальную составляющую, $S_x + \text{Spec}_x = 35\,862$, минимальное количество неверных определений d_x $N_m = 3669$ при оптимальном значении $\bar{D}_{\text{пор}} = 5,5$ (рис. 2).

Примечательно, что величина d_R , сравниваемая с пороговой величиной по абсолютному значению в (3), отрицательна в области блика на снимке I_0 (рис. 3), также отрицательное значение она будет принимать в случае самозатенений, так как на одном из смежных снимков значение яркости будет меньше условной (без самозатенения в этой же точке) яркости отраженного света. Эта информация может быть использована для дальнейшей классификации.

Сегментации области бликов, затенений и переотражений

Для сегментации изображения рассматриваются только точки, где $d_x = 0$ или $d_y = 0$, так как если $d_x = 1$ & $d_y = 1$, то в этой точке градиент поверхности может быть вычислен, исходя из значений яркости любых изображений.

Если $d_x = 0$ & $d_y = 1$ (или $d_x = 1$ & $d_y = 0$), то гарантированно может быть вычислено значение

только одного приращения, для вычисления всего градиента необходимо определить, на каком из смежных снимков присутствует затенение или блик. В большинстве случаев ситуация $d_x = 0$ & $d_y = 1$ означает наличие затенения или блика на одном из смежных снимков. Вероятность пересечения зеркальных областей, областей затенения на смежных снимках мала. Случай $d_x = 0$ & $d_y = 0$ означает наличие затенения, бликов или переотражений на любом снимке, за исключением затенений на дополнительном снимке.

Для обработки ситуаций $d_x = 0$ & $d_y = 1$, $d_x = 1$ & $d_y = 0$, $d_x = 0$ & $d_y = 0$ и точного вычисления градиента поверхности необходимо исключить те снимки, из-за которых возникает отклонение от модели диффузного отражения света.

Затенения отличаются от вторичного освещения или блика тем, что яркость затененного отсчета равна нулю, в то время как вторичное освещение добавляет к яркости некоторую величину. Идеальное затенение соответствует $I_k = 0$, при наличии посторонних источников света и шума сравнение яркости с нулем не имеет смысла. Чуть более действенный способ — сравнение с некоторой пороговой величиной, определяющей колебания в тени, но этот подход малоэффективен при непостоянном K , так как не использует корреляцию значений яркости точек изображений в наборе.

Для того чтобы более полно описать процесс получения снимков, будем использовать следующее уравнение яркости пиксела на изображении при постоянном коэффициенте отражения без учета вторичных источников:

$$i_k(x, y) = s_k(x, y) \mathbf{L}_k \mathbf{n},$$

где s_k — элемент матрицы затенений снимка \mathbf{S}_k , которая имеет ту же размерность, что и изображение, и может принимать в каждой точке значение 0 или 1. Если $s_k(x, y) = 0$, то в точке присутствует затенение и $i_k(x, y)$ обращается в ноль.

Для того чтобы определить наиболее вероятное расположение затенений на снимках, следует подобрать $\hat{s}_0, \hat{s}_1, \hat{s}_1^1, \hat{s}_2, \hat{s}_2^1$, наиболее удовлетворяющие значениям яркости пикселей. В общем случае необходимо минимизировать величину

$$R(x, y) = \sum_{k=0}^{N-1} (\hat{s}_k(x, y) \mathbf{L}_k \mathbf{n} - i_k(x, y))^2,$$

где N — количество изображений. Результатом для каждой точки является как набор $\hat{s}_0, \hat{s}_1, \hat{s}_1^1, \hat{s}_2, \hat{s}_2^1$, так и вектор нормали \mathbf{n} к поверхности, который при отсутствии бликов или переотражений с определенной точностью близок к искомому значению ориентации поверхности. Значение \mathbf{S}_0 практически в каждой точке должно равняться 1, но может принимать нулевые значения на границах объекта.

Множество $\hat{s}_0, \hat{s}_1, \hat{s}_1^1, \hat{s}_2, \hat{s}_2^1$ конечно, и область возможных решений может быть также сокращена за счет использования результатов проверки D_x (рис. 4, а), D_y . Например, комбинация 1,0,1,0,1 при $d_x = 1$ & $d_y = 1$ невозможна.

При $d_x = 0$ & $d_y = 1$ достаточно рассмотреть четыре варианта множества $\hat{s}_0, \hat{s}_1, \hat{s}_1^1, \hat{s}_2, \hat{s}_2^1$: (1,1,1,0,0), (1,1,1,0,1), (1,1,1,1,0) и (1,1,1,1,1).

Отмеченные $\hat{s}_1 = 0, \hat{s}_1^1 = 0$ области соответствуют случаю затенения. Точки, отмеченные $\hat{s}_1 = 1$ & $\hat{s}_1^1 = 1$, для которых $D_x = 0$, принадлежат блику или переотражению или ложно определены в результате высокого уровня шума. На рис. 4, б точки, соответствующие ситуации $\hat{s}_0, \hat{s}_1, \hat{s}_1^1, \hat{s}_2, \hat{s}_2^1 = (1, 1, 1, 1, 1)$, изображены белыми, соответствующие $\hat{s}_0, \hat{s}_1, \hat{s}_1^1, \hat{s}_2, \hat{s}_2^1 = (1, 0, 1, 1, 1)$ — темно-серыми, $\hat{s}_0, \hat{s}_1, \hat{s}_1^1, \hat{s}_2, \hat{s}_2^1 = (1, 0, 1, 1, 1)$ — светло-серыми.

Важно отметить, что для области $d_x = 0$ & $d_y = 1$ величина R представляет собой функцию одной переменной p , так как $d_y = 1$ позволяет вычислить значение q .

Согласно выдвинутому предположению [9], при наличии блика из рассмотрения может быть исключен самый яркий пиксель, в случае затенения — самый темный. Причем рассматривается модель отражения Торренса — Спарроу [8, 9], согласно которой зеркальная составляющая проявляется лишь на некоторых участках, т. е. используется возможность сканировать поверх-

ность, рассматривая только диффузно отражающие участки поверхности. Проанализировав результат, представленный на рис. 3, 4, аналогичный вывод можно сделать и для модели Фонга.

Для ситуации $d_x = 0$ & $d_y = 1$ ($d_x = 1$ & $d_y = 0$) при $\hat{s}_0, \hat{s}_1, \hat{s}_1^1, \hat{s}_2, \hat{s}_2^1 = (1, 1, 1, 1, 1)$, т. е. при блике на одном из снимков I_1, I_1^1 (рис. 5, а), при вычислении градиента p из I_1, I_1^1 исключается самый яркий пиксель. Блик на снимке I_0 может быть определен значительно проще. Достаточно сопоставить проверку

$$\begin{cases} d_{xy0}(x, y) = 1, & i_1(x, y) + i_1^1(x, y) - i_2(x, y) - \\ & - i_2^1(x, y) < \bar{D}_{\text{пор}} + \max(\bar{I}_c); \\ d_{xy0}(x, y) = 0 & \text{в противном случае} \end{cases}$$

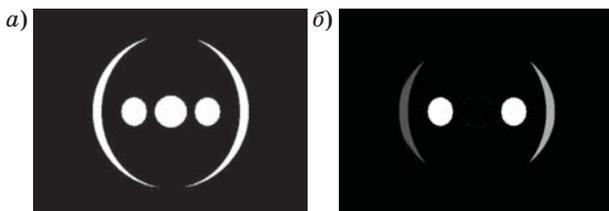
с $D_x | D_y$. Сравнивая отклонение от диффузной модели отражения D_x, D_y с дополнительным снимком I_0 и без него D_{xy0} , в силу отсутствия на нем затенений могут быть выделены блики на снимке I_0 (рис. 5, а-в). На рис. 5, в представлена область D_{xy0} для фигуры, полученной в результате вращения овала Кассини, область точек $d_x = 0$ на рис. 5, б включает в себя блик на снимке I_0 .

Полученная в области бликов ориентация поверхности должна быть такова, что нормаль совпадает с вектором

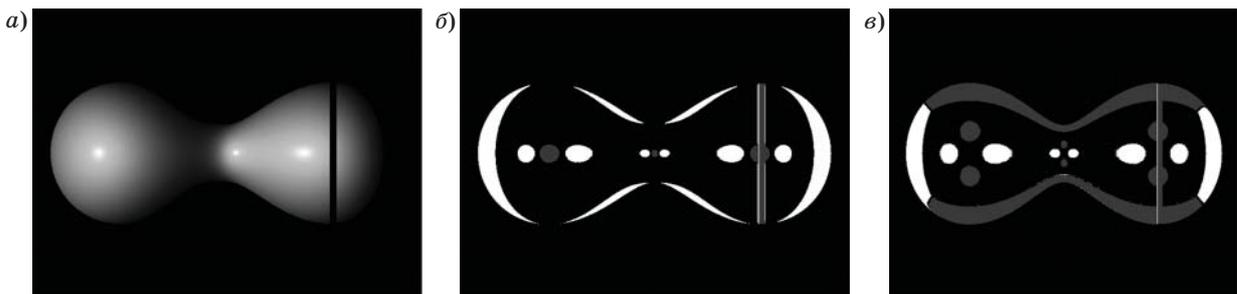
$$\mathbf{v}_k = \frac{\mathbf{L}_k - \bar{\mathbf{z}}}{|\mathbf{L}_k - \bar{\mathbf{z}}|},$$

где $\bar{\mathbf{z}}$ — единичный вектор, направленный вдоль оси z . Важно отметить, что переотражения не будут удовлетворять этому условию.

Среди отмеченных областей затенений может быть выделена подгруппа самозатенений. Наличие самозатенения не зависит от ориентации поверхности, а обусловлено взаимным расположением частей фигуры, поэтому при $s_k = 0$ условное значение яркости $\mathbf{L}_k \hat{\mathbf{n}} > 0$ будет сигнализировать о самозатенении. Но в этом случае необходимо вычислить градиент или использовать значения \mathbf{n} , в которых был установлен минимум R . Наиболее простой вариант — определять



■ Рис. 4. Результат сегментации для сферы при $\varphi_S = 30^\circ$: а — область D_x ; б — результат сегментации области точек $d_x = 0$ & $d_y = 1$. Модель Фонга



■ Рис. 5. Области затенений фигуры, полученной в результате вращения овала Кассини при $\varphi_S = 30^\circ$: а — снимок I_1 ; б — знак d_R в области точек D_x ; в — знак d_R в области точек D_{xy0} . Модель Фонга

самозатенения по отрицательному значению d_R . На рис. 5, б белыми отмечены области, для которых $d_R > 0$, серыми — области, для которых $d_R < 0$.

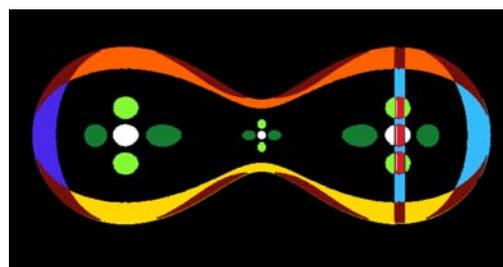
Сегментация области $d_x = 0$ & $d_y = 0$

В области точек $d_x = 0$ & $d_y = 0$ при $\hat{s}_0 = 1$ необходимо рассматривать все 16 возможных вариантов множества $\hat{s}_1, \hat{s}_1^1, \hat{s}_2, \hat{s}_2^1$, но, например, $\hat{s}_1 = 0$ & $\hat{s}_1^1 = 0$ будет означать наличие трех линейно зависимых снимков, т. е. вычисление градиента не может быть гарантировано. Поэтому 7 вариантов искомого множества: $(1,0,0,0,0)$, $(1,0,0,0,1)$, $(1,0,0,1,0)$, $(1,0,0,1,1)$, $(1,0,1,0,0)$, $(1,1,0,0,0)$, $(1,1,1,0,0)$, — которые сигнализируют о затенениях на обоих смежных снимках, будут означать недоступность точки для реконструкции.

Любая ситуация $(1,0,1,0,1)$, $(1,1,0,0,1)$, $(1,0,1,1,0)$, $(1,1,0,1,0)$ при $d_R > 0$ означает наличие затенений на двух снимках; из-за невозможности пересечения области блика и затенения вычисление осуществляется по незатененным снимкам. На рис. 6 этой ситуации соответствует область, закрашенная бордовым цветом.

Ситуации $(1,0,1,1,1)$, $(1,1,0,1,1)$, $(1,1,1,1,0)$, $(1,1,1,0,1)$ при $d_R < 0$ будут означать наличие самозатенений, области которых могут пересекаться с областью бликов на другой паре смежных снимков, остальные затенения с бликами пересекаться не могут. Ситуация, сигнализирующая о самозатенении, не позволяет в этот же момент определить наличие блика на другом снимке в этой точке. В этом случае для вычисления из трех незатененных пикселей исключается самый яркий. На рис. 6 этой ситуации соответствует область, закрашенная красным.

Ситуация $(1,1,1,1,1)$ будет сигнализировать о блике на снимке I_0 . На рис. 6 этой ситуации соответствует область белого цвета. Зеленым изо-



■ Рис. 6. Окончательная сегментация для овала Кассини

бражены блики на снимках I_1, I_1^1 , салатovým — блики на снимках I_2, I_2^1 .

Все точки фигуры, полученной вращением овала Кассини, доступны для вычисления градиента, но необходимо учитывать, что в слабоосвещенных областях, граничащих с затенениями, погрешность вычисления будет значительно выше по сравнению с погрешностью в остальных областях.

Заключение

Представленный алгоритм сегментации затенений и бликов в большей степени базируется на информации о взаимном расположении источников света и корреляции значений яркости в наборе. Несмотря на то, что в обоих случаях ключевым фактором, влияющим на качество сегментации, является использование избыточного количества снимков, количество снимков в наборе более пяти не позволяет добиться значительного улучшения в качестве, при этом усложняя процесс сегментации. Использование алгоритма не просто позволяет отбрасывать самый яркий или темный пиксел, а в большинстве случаев указывает конкретную ситуацию на конкретном снимке. Но даже при сокращении множества возможных вариантов сегментация может занять значительное время.

Литература

1. Woodham R. J. Photometric Method for Determining Surface Orientation from Multiple Images // Optical Engineering. 1980. Vol. 19. N 1. P. 139–144.
2. Woodham R. J. Gradient and Curvature from the Photometric-Stereo Method, Including Local Confidence Estimation // Journal of Optical Society of America. Nov. 1994. Vol. 11. N 11. P. 3050–3068. doi:10.1364/JOSAA.11.003050
3. Hertzmann A., Seitz S. M. Example-Based Photometric Stereo: Shape Reconstruction with General Varying BDRFs // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. Aug. 2005. Vol. 27. N 8. P. 1254–1264. doi:10.1109/TPAMI.2009.102

4. Horn B. Height and Gradient from Shading // International Journal of Computer Vision. 1990. Vol. 5. N 1. P. 37–75.
5. Красильников Н. Н., Красильникова О. И. Исследование погрешностей определения координаты глубины при 3D-сканировании методом, основанным на диффузном отражении света // Информационно-управляющие системы. 2012. № 3(58). С. 2–8.
6. Красильников Н. Н. Метод получения 3D-изображений, основанный на диффузном отражении света сканируемыми объектами // Информационно-управляющие системы. 2009. № 6(43). С. 7–11.
7. Кузнецов В. А. Прогнозирование ошибки вычисления ориентации поверхности, обусловленной квантованием, для метода трехмерного сканирования, основанного на диффузном отражении света // На-

учная сессия ГУАП: сб. докл. В 3 ч. Ч. 1. Технические науки. СПб.: ГУАП, 2013. С. 89–91.

8. Solomon F., Ikeuchi K. Extracting the Shape and Roughness of Specular Lobe Objects Using Four Light Photometric Stereo // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. Apr. 1996. Vol. 18. N 4. P. 449–454.
9. Barsky S., Petrou M. The 4-source Photometric Stereo Technique for Three-Dimensional Surfaces in the Presence of Highlights and Shadows // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelli-*

gence. Oct. 2003. Vol. 25. N 10. P. 1239–1252. doi:10.1109/TPAMI.2003.1233898

10. Hernandez C., Vogiatzis G., Cipolla R. Overcoming Shadows in 3-source Photometric Stereo // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. Feb. 2011. Vol. 33. N 2. P. 419–426.
11. Chandraker M., Agarwal S., Kriegman D. Shadowcuts: Photometric Stereo with Shadows // *Proc. of IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2007. doi:10.1109/CVPR.2007.383288

UDC 612.8

doi:10.15217/issn1684-8853.2015.3.29

Image Segmentation Technique for Photometric Stereo

Kuznetsov V. A.^a, Assistant Professor, k.avk-c@mail.ru

^aSaint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaya St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation

Purpose: Previous to surface gradient calculation by photometric stereo, it is necessary to prevent any inconsistency between the used reflectance model and the input data. The most effective way free from any object pre-processing is the fragmentation of the source images. The purpose of the work is to define and systematize the features of shadows, highlights and reflections, and to develop a segmentation algorithm which would take into account the specificity of photometric stereo. **Methods:** The experimental data were obtained by computer simulation of source images using the Phong reflection model. For image segmentation, we used the features of highlights and shading based on verified linear dependence of the intensities of images from the same plane and on the minimized function of the deviation between the input data and the model-fitting data. **Results:** A photometric 3D scanner configuration is defined, consisting of five fixed light sources. With this configuration, you can use additional features of shadows, interreflections and highlights during the image segmentation. The redundant number of images ensures that at least three intensities at each visible point are well verified. An algorithm was developed for checking the conformity between the input data and the light reflection model used for the calculation. In this algorithm, for the majority of the visible points, the problem of two-variable function minimization needs no solution or can be reduced to the problem of single variable function minimization. A result of the segmentation is shown for two objects. One of these objects is modeled with highlights and surface gaps, which often make it difficult to calculate the surface orientation. **Practical relevance:** Compared to its analogues, the developed algorithm reduces the time required for the visible area segmentation and provides more elaborate segmentation of the source images.

Keywords — Photometric Stereo, Image Segmentation, Shadows, Highlights.

References

1. Woodham R. J. Photometric Method for Determining Surface Orientation from Multiple Images. *Optical Engineering*, 1980, vol. 19, no. 1, pp. 139–144.
2. Woodham R. J. Gradient and Curvature from the Photometric-Stereo Method, Including Local Confidence Estimation. *Journal of Optical Society of America*, November 1994, vol. 11, no. 11, pp. 3050–3068. doi:10.1364/JOSAA.11.003050
3. Hertzmann A. and Seitz S. M. Example-Based Photometric Stereo: Shape Reconstruction with General Varying BDRFs. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, August 2005, vol. 27, no. 8, pp. 1254–1264. doi:10.1109/TPAMI.2009.102
4. Horn B. Height and Gradient from Shading. *International Journal of Computer Vision*, 1990, vol. 5, no. 1, pp. 37–75.
5. Krasilnikov N. N., Krasilnikova O. I. The Investigation of Measurement Errors of Depth Coordinate during 3D Scanning by the Method based on Diffuse Reflection of Light. *Informatsionno-upravliayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2012, no. 3(58), pp. 2–8 (In Russian).
6. Krasilnikov N. N. A Method of 3D Scanning Based on Scanned Objects' Light Radiosity. *Informatsionno-upravliayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2009, no. 6(43), pp. 7–11 (In Russian)
7. Kuznetsov V. A. The Maximum Calculation Error of Surface Orientation, Received from The Method, Based on Surface Reflection Model. *Nauchnaya Sessiya GUAP. Ch. 1. Tekhnicheskie Nauki* [Reports Collection of Scientific Session SUAI. Ch. 1. Engineering Science], Saint-Petersburg, 2013, pp. 89–91 (In Russian).
8. Solomon F. and Ikeuchi K. Extracting the Shape and Roughness of Specular Lobe Objects Using four Light Photometric Stereo. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, April 1996, vol. 18, no. 4, pp. 449–454.
9. Barsky S., Petrou M. The 4-source Photometric Stereo Technique for Three-dimensional Surfaces in the Presence of Highlights and Shadows. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, October 2003, vol. 25, no. 10, pp. 1239–1252. doi:10.1109/TPAMI.2003.1233898
10. Hernandez C., Vogiatzis G., Cipolla R. Overcoming Shadows in 3-source Photometric Stereo. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, February 2011, vol. 33, no. 2, pp. 419–426.
11. Chandraker M., Agarwal S., Kriegman D. Shadowcuts: Photometric Stereo with Shadows. *Proc. of IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2007. doi:10.1109/CVPR.2007.383288

УПРАВЛЕНИЕ КОМБИНИРОВАННЫМ ВЫВОДОМ В ДИСКРЕТНЫХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

А. Я. Фридман^а, доктор техн. наук, профессор

^аИнститут информатики и математического моделирования технологических процессов КНЦ РАН, Апатиты, РФ

Постановка проблемы: из-за больших объемов информации, хранящейся в базах данных и знаний интеллектуальных систем, степень отличия механизма обработки этой информации от полного перебора считается мерой интеллектуальности подобных систем. На сокращение перебора, в частности, направлены различные способы управления выводом, в том числе ранее предложенный автором метод управления прямым выводом в интеллектуальных системах с дискретными доменами переменных путем анализа эвристических индикаторов хода вывода, использующих некоторые подмножества этих доменов. Однако этот метод однонаправленный, что не позволяет ускорить вывод за счет своевременного изменения его направления и эффективного разрешения конфликта. Цель настоящей работы состоит в распространении того же теоретико-множественного подхода на задачи управления комбинированным выводом и разрешением конфликта для сокращения перебора вариантов продолжения вывода. **Результаты:** разработана динамическая стратегия управления комбинированным детерминированным и вероятностным выводом в дискретных продукционных интеллектуальных системах, анализирующая структуру следствий из входящих в конфликтное множество продукций и сравнивающая ее со структурой предпосылок цели вывода, чтобы выбрать продукцию, применение которой способно в максимальной степени подтвердить истинность текущей цели. Известно, что динамические стратегии обеспечивают большую гибкость, чем встроенные, в которых ход выбора предопределен априорно. Предложенный подход к представлению и анализу информации в интеллектуальных системах отличается от существующих тем, что в нем оперативно учитывается внутренняя структура данных и знаний интеллектуальной системы. Это позволяет повысить скорость вывода в дискретной интеллектуальной системе. **Практическая значимость:** представленные в работе правила управления применением продукций позволяют ускорить процесс достижения цели вывода при детерминированном, вероятностном и нечетком представлении информации в интеллектуальной системе.

Ключевые слова — дискретная интеллектуальная система, комбинированный вывод, управление применением продукций.

Введение

Задача в интеллектуальных системах (ИнС) в самом общем виде определяется как пара (S, G), где S — исходная информация (source — что дано), а G — целевая информация (goal — что найти, получить). В качестве S и G могут служить совокупности известных фактов, ситуаций и состояний. Для конкретности далее исследуются ИнС с продукционной базой знаний (БЗ).

Информация о задаче и ходе ее решения хранится в базе данных (БД), а о способах изменения данных — в БЗ. Каждое правило (продукция) состоит из двух частей. В левой описывается группа фактов или знания о текущей ситуации, а в правой содержатся действия, которые должны быть выполнены, если в БД найдется информация, соответствующая левой части правила. Действия правила могут состоять в модификации набора фактов в БД, например, в добавлении нового факта. Эти новые факты в свою очередь могут быть в дальнейшем использованы для сопоставления с левыми частями других правил. Отсюда следует, что применение правила состоит из двух этапов: сопоставления левой части правила с текущим состоянием БД и (в случае успешного сопоставления) выполнения действий, указанных в правой части правила.

Процесс применения правил порождает цепочку вывода. Существуют два основных способа ее порождения. Один из них получил название прямого вывода, а другой — обратного. При прямом выводе поиск новой информации происходит в направлении стрелок (импликаций), разделяющих левые и правые части правил. Решатель ИнС использует информацию из левых частей, чтобы вывести информацию, содержащуюся в правых частях. Поэтому иногда прямой вывод называют поиском в пространстве состояний ИнС.

Обратный вывод основан на идее сведения задачи к набору более мелких подзадач, решение которых в совокупности эквивалентно решению исходной задачи. Они декомпозируются дальше, и т. д., в результате первоначальная цель реализуется последовательностью элементарных действий, например запросами информации об истинности или ложности исходных данных, нужных для достижения цели вывода.

Наиболее гибкий способ вывода — комбинированный, когда режимы прямого и обратного вывода чередуются по мере исчерпания возможности получения новых фактов в текущем направлении вывода. Комбинированный вывод реализован во многих ИнС, самая известная из них — экспертная система PROSPECTOR [1].

Различные способы управления выводом способствуют сокращению перебора, в том числе предложенный авторами [2] метод управления прямым выводом в интеллектуальных системах с дискретными доменами переменных путем анализа эвристических индикаторов хода вывода, использующих некоторые подмножества этих доменов. Однако из-за однонаправленности этого метода невозможно ускорить вывод за счет своевременного изменения его направления и эффективного разрешения конфликта. В настоящей работе предлагается сократить перебор вариантов продолжения вывода на основе того же теоретико-множественного подхода к задачам управления комбинированным выводом и разрешением конфликта.

Конфликт в ИнС диагностируется решателем (интерпретатором), когда имеется несколько вариантов продолжения вывода и нужно выбрать наиболее перспективное из них [3]. Чаще всего конфликт возникает, если на некотором шаге вывода $v = 1, 2, \dots$ появляется несколько продукций, предпосылки которых подтверждаются текущим множеством фактов, хранящихся в БД. Эти продукции называют *конфликтным множеством* (CS_v — conflict set).

Существуют следующие основные способы разрешения конфликта.

1. Правилам заранее приписываются приоритеты, и между ними устанавливается отношение общего порядка. Из CS_v выбирается правило с максимальным приоритетом.

2. На множестве правил устанавливается частичный порядок, и выбирается подмножество правил с максимальным приоритетом. Например, правило P_j предпочтительнее правила P_l тогда и только тогда, когда левая часть правила P_l (представленная как множество фактов) является подмножеством левой части правила P_j . Первым применяется правило с более длинным списком фактов в левой части. Такой способ разрешения конфликта получил название «специальный случай».

3. На фактах в БД задается отношение полного порядка. Из CS_v выбирается та продукция, в левой части которой используются данные с максимальным приоритетом. Примером такого подхода служит приписывание возраста фактам в БД, тогда из CS_v выбирается продукция, использующая наиболее «молодые» факты.

4. На данных из БД задается отношение частичного порядка, с учетом которого разрешается конфликт, как и в способе 3.

5. Случайный выбор используют в случаях, когда после применения других способов разрешения конфликта не происходит выбора ни одного правила из CS_v .

Общий недостаток перечисленных способов состоит в том, что они не учитывают внутреннюю

структуру заложенных в ИнС знаний. Поэтому ниже предлагается способ управления выводом, анализирующий структуру следствий из входящих в CS_v продукций и сравнивающий ее со структурой предпосылок цели вывода, чтобы выбрать продукцию, применение которой позволяет ускорить процесс достижения этой цели.

Формализация задачи и алгоритм комбинированного детерминированного вывода

Пусть набор переменных x_i , которые могут быть результатами вывода, задан в универсуме $U = X_1 \times X_2 \times \dots \times X_n$, где X_i — дискретные или дискретизированные домены (множества допустимых значений) соответствующих переменных.

Тогда любой факт, хранящийся в БД, можно представить в виде свидетельства «за» некоторые допустимые значения переменной:

$$x_i \in \Phi_i^+, \Phi_i^+ \subseteq X_i, \quad (1)$$

либо в виде свидетельства «против» некоторых допустимых значений:

$$x_i \notin \Phi_i^-, \Phi_i^- \subseteq X_i. \quad (2)$$

Появление факта вида (2) при детерминированном выводе можно интерпретировать как «сужение» домена, приняв

$$X_i^{v+1} = X_i^v \setminus \Phi_i^- \quad (3)$$

и $X_i^0 = X_i$, поэтому в следующем разделе принято, что в БД есть только факты вида (1).

Продукции в БЗ ИнС обычно хранятся в формате «условие — действие» [2]:

$$A_j \supset B_j, \quad (4)$$

где A_j и B_j — конъюнкции утверждений вида (1) или (2). Для простоты будем считать, что каждое из этих утверждений есть высказывание. Цель вывода G задается как такая же конъюнкция.

Алгоритм комбинированного детерминированного вывода

Шаг 1. Интеллектуальная система начинает работать в режиме обратного вывода, когда каждый из конъюнктов начальной (глобальной) цели сравнивается с конъюнктами правых частей B_j продукций (4) и, если найдена продукция, позволяющая определить истинность этого конъюнкта, вместо него в формулу цели подставляются конъюнкты, содержащиеся в левой части A_j такой продукции. Если ни одна продукция не подходит, ИнС переходит в режим прямого вывода.

Шаг 2. При прямом выводе левые части продукций (4) сравниваются с фактами вида (1), имеющимися в БД ИнС. Начальное множество фактов вводится в ИнС извне (пользователем или

автоматически). Если найдена продукция, левая часть которой A_j подтверждается текущим набором фактов (т. е. истинны все содержащиеся в ней конъюнкты), и эта продукция исполняется, то в БД добавляются все факты вида (1), содержащиеся в B_j . При появлении фактов вида (2) домены соответствующих переменных сужаются по формуле (3). Если нет подходящих продукций, то ИнС возвращается в режим обратного вывода, причем в качестве цели выбирается только часть конъюнктов, содержащихся в текущей цели вывода (иначе обратный вывод сразу остановится).

При реализации описанного выше комбинированного вывода возможны две проблемы: 1) конфликт между продукциями при прямом выводе и 2) неоднозначность выбора подмножества конъюнктов текущей цели для продолжения обратного вывода. Для разрешения подобных проблем предназначены стратегии управления выводом, обычно имеющие эвристический характер [2]. Ниже предлагается одна из таких стратегий, основанная на идеях анализа состава атрибутов и сравнения мощностей множеств, которые предложены авторами для расчета меры неопределенности следствия в рамках алгебры кортежей [4, 5].

Стратегия управления детерминированным выводом

Алгоритм разрешения конфликта

Пусть на некотором шаге v вывода конфликтное множество имеет вид

$$CS_v = \{P_1, P_2, \dots, P_j, \dots, P_N\}, \quad (5)$$

где каждая продукция P_j устроена как в (4).

Пусть также к этому шагу текущая цель задана M предпосылками:

$$G_v = G_1 \wedge G_2 \wedge \dots \wedge G_k \dots \wedge G_M, \quad (6)$$

причем структура G_k та же, что у конъюнктов, входящих в A_j и B_j , т. е. имеет вид (1) или (2).

Тогда цель разрешения конфликта состоит в выборе такой продукции из (5), применение которой в максимальной степени подтвердит истинность текущей цели.

Для этого в следствии каждой продукции из (5) выберем только множество конъюнктов с переменными, одинаковыми с конъюнктами текущей цели (6), вычтем содержащиеся в них множества значений переменных Φ_{ij}^+ из аналогичных множеств Φ_{ik}^+ в (6) и вычислим мощность декартова произведения полученных разностей, обозначив его $\delta\Phi_{ik}^v$. Эта мощность показывает количество сочетаний значений переменных, истинность которых останется неопределенной после применения данной продукции. Поэтому следует применить ту продукцию из CS_v , для которой число $\delta\Phi_{ik}^v$ минимально.

Выбор подмножества конъюнктов цели для обратного вывода

Здесь идея та же, что и при разрешении конфликта: выбрать из конъюнктов текущей цели (6) те, истинность которых легче всего выяснить с помощью имеющейся информации, но теперь «степень истинности» нужно сравнивать с фактами, содержащимися в БД. При этом уже нет необходимости анализировать множества значений переменных в Φ_k^+ , достаточно выбрать из (6) те конъюнкты, в которых имена переменных совпадают с именами переменных в фактах из БД.

С учетом изложенного получается следующий алгоритм.

Алгоритм управления комбинированным детерминированным выводом

Шаг 1. Проверка истинности всех конъюнктов глобальной цели G_v . Если все они истинны, то стоп: истинность глобальной цели доказана имеющимися фактами. Если есть хотя бы один ложный конъюнкт, то стоп: истинность глобальной цели противоречит имеющимся фактам. Ложность конъюнкта констатируется, когда после пересчета по формуле (3) получено $X_i^{v+1} = \emptyset$. Если есть конъюнкты, истинность которых еще не определена, из них формируется текущая цель (6).

Шаг 2. Обратный вывод: каждый из конъюнктов текущей цели (6) сравнивается с правыми частями B_j всех продукций (4), содержащихся в БЗ, и если найдена продукция, позволяющая определить истинность этого конъюнкта, вместо него в формулу цели подставляются конъюнкты, содержащиеся в левой части A_j такой продукции. Если ни одна из имеющихся в БЗ продукций не подходит, ИнС переходит в режим прямого вывода.

Шаг 3. Прямой вывод: левые части продукций (4) из БЗ сравниваются с фактами, имеющимися в БД ИнС. Если найдена продукция, левая часть которой A_j подтверждается текущим набором фактов (т. е. истинны все содержащиеся в ней конъюнкты), она добавляется в конфликтное множество CS_v . Если нет подходящих продукций, то переход к процедуре разрешения конфликта.

Шаг 4. Разрешение конфликта: вычисление $\delta\Phi_{ik}^v$ для каждой продукции из CS_v и применение той продукции, для которой число $\delta\Phi_{ik}^v$ минимально. При этом в БД добавляются факты вида (1), входящие в левую часть примененной продукции, и по формуле (3) перевычисляются домены переменных, о которых появились факты вида (2). Если (6) не имеет общих переменных со следствиями продукций из CS_v , то переход на шаг 1.

Шаг 5. Выбор подмножества конъюнктов цели для обратного вывода: выбор из (6) тех конъюнктов, в которых имена переменных совпадают с именами переменных в текущем множестве

фактов из БД. Если такие найдены, то соответствующие конъюнкты включаются в G_v и переход на шаг 1. Если совпадений нет, то стоп: вывод завершен неуспешно — истинность глобальной цели нельзя выяснить по имеющимся фактам. Ложность цели вывода констатируется, когда доказана ложность хотя бы одного конъюнкта из (6), т. е. в нем не осталось ни одного возможного значения.

Управление вероятностным выводом

При вероятностном выводе каждому значению каждой переменной x_i , т. е. каждому элементу x_{ir} множества X_i (пусть мощность этого множества равна N_i), приписывается некоторое значение текущей вероятности $p_v(x_{ir})$ того, что переменная x_i принимает значение x_{ir} . В начале вывода обычно считают, что все возможные значения переменных равновероятны, т. е.

$$p_0(x_{ir}) = 1/N_i. \quad (7)$$

Естественно, пользователь имеет возможность изменить начальное распределение вероятностей значений переменных.

Факты могут попасть в БД двумя путями: они либо вводятся пользователем по запросу ИнС, либо выводятся применением одной из продукций. В обоих случаях при вероятностном выводе каждому факту (1) или (2) приписывается некоторая вероятность, означающая, что переменная x_i принимает или не принимает значения, указанные, соответственно, во множествах Φ_i^+ или Φ_i^- . Для листовых фактов (вводимых вручную) это делает пользователь, при срабатывании какого-либо правила она вычисляется с учетом вероятностей фактов, входящих в предпосылки этого правила, и вероятности самого правила p_j , отражающей мнение экспертов о достоверности причинно-следственной связи между предпосылками и следствиями правила [6]. По понятным причинам в БЗ ИнС входят только достаточно достоверные правила, для которых p_j превышает заданное пороговое значение (например, 0,9 или выше [7]). Таким образом, для правил вероятностного вывода вместо (4) требуется формат

$$A_j \supset B_j, p_j. \quad (8)$$

Обычно [6] всем следствиям сработавшего правила приписывается вероятность, равная произведению p_j на вероятность условия этого правила, которая определяется как минимальная вероятность одного из конъюнктов, входящих в предпосылки правила, либо как произведение вероятностей таких конъюнктов.

После вычисления вероятностей следствий правила по известным формулам пересчета априорной вероятности в апостериорную [7] вычисля-

ется новое распределение вероятностей значений переменных, входящих в следствия примененного правила.

Детальное рассмотрение вопросов вычисления текущих распределений вероятностей значений переменных универсума U выходит за рамки настоящей работы, поскольку здесь нас интересуют отличия стратегии управления вероятностным выводом по сравнению с представленным выше детерминированным выводом. Они состоят в следующем.

1. «Сужение» текущих доменов переменных универсума аналогично (3) обычно производится все же для ускорения хода вывода, но из списка возможных значений некоторой переменной исключаются не все значения, указанные в фактах (2) «против», а только те, текущая апостериорная вероятность которых стала нулевой либо ниже заданной минимально допустимой величины (например, 0,1 или 0,2 [5, 6]).

2. В конфликтное множество (5) включаются только продукции, в условии которых перечисляются достаточно вероятные факты (например, минимальная вероятность конъюнктов равна 0,9 или 0,8 [6, 7]). Процедура разрешения конфликта строится аналогично детерминированному выводу, но при сопоставлении следствий правил (5) и конъюнктов цели (6) также учитываются только достаточно вероятные подмножества Φ_i^+ или Φ_i^- доменов переменных.

3. При выборе конъюнктов цели для обратного вывода анализируются не только имена входящих в них переменных, но и подмножества их значений Φ_i^+ или Φ_i^- с учетом текущих вероятностей составляющих эти подмножества значений переменных. Для доказательства ложности цели выбираются подмножества с наиболее низкими вероятностями, для доказательства истинности — с наиболее высокими.

4. Алгоритм управления комбинированным вероятностным выводом включает те же шаги, что и алгоритм управления детерминированным выводом, но единственным критерием преждевременного завершения вывода здесь является ложность одного из конъюнктов цели (6), в противном случае вывод продолжается, пока в БЗ есть применимые продукции. Когда таковых не остается, реализуется дополнительный шаг алгоритма, ответственный за интерпретацию результата вывода.

5. В недетерминированных (вероятностных, нечетких и др.) стратегиях управления выводом проблема интерпретации результата намного сложнее, чем в детерминированных стратегиях. В общем случае ее решение связано с созданием специальных процедур интерпретации, в основном эвристических и существенно зависящих от предметной области ИнС. Поэтому в настоящей работе они не рассматриваются.

Заключение

Разработанная стратегия управления выводом относится к динамическим (настраиваемым [3, 8]) стратегиям, так как параметры выбора на каждом шаге вывода зависят от результатов предыдущего шага. Такие стратегии обеспечивают большую гибкость, чем встроенные [3, 8] стратегии, в которых ход выбора предопреде-

лен априорно. Предложенный теоретико-множественный подход к представлению и анализу информации в ИнС применим как к детерминированному выводу, так и к вероятностному или нечеткому.

Работа частично поддержана грантами РФФИ (проекты № 13-07-00318-а, 14-07-00256-а, 14-07-00257-а, 14-07-00205-а, 15-07-04760-а, 15-07-02757-а).

Литература

1. Уотермен Д. Руководство по экспертным системам: пер. с англ. — М.: Мир, 1989. — 388 с.
2. Фридман А. Я., Кулик Б. А., Курбанов В. Г. Метод управления прямым логическим выводом в интеллектуальных системах с дискретными доменами переменных // Информационно-управляющие системы. 2015. № 1. С. 29–34. doi:10.15217/issn1684-8853.2015.1.29
3. Лорьер Ж.-Л. Системы искусственного интеллекта: пер. с франц. — М.: Мир, 1991. — 568 с.
4. Кулик Б. А., Зуенко А. А., Фридман А. Я. Алгебраический подход к интеллектуальной обработке данных и знаний. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. — 235 с.
5. Зуенко А. А., Кулик Б. А., Фридман А. Я. Новые аспекты логического вывода: рост неопределенности и индуктивное обобщение // Шестая Всероссийская конференция по проблемам управления, 30 сентября–5 октября 2013 г.: материалы конференции. В 4 т. — Ростов-на-Дону: Изд-во Южного федерального ун-та, 2013. Т. 1. С. 34–39.
6. Марселлус Д. Программирование экспертных систем на Турбо Прологе. — М.: Финансы и статистика, 1994. — 256 с.
7. Darwiche A. Modeling and Reasoning with Bayesian Networks. — Cambridge University Press, 2009. — 526 p.
8. Рассел С., Норвиг П. Искусственный интеллект: современный подход (AIMA): пер. с англ. 2-е изд. — М.: Вильямс, 2005. — 1424 с.

UDC 519.673:004.9

doi:10.15217/issn1684-8853.2015.3.35

Control of Combined Inference in Discrete Intelligence Systems

Fridman A. Ya.^a, Dr. Sc., Tech., Professor, fridman@iimm.ru

^aInstitute for Informatics and Mathematical Modelling of Technological Processes of KSC RAS, 24A, Fersman St., 184209, Apatity, Murmansk Region, Russian Federation

Purpose: Due to ample quantities of information stored in data and knowledge bases of intelligence systems, the degree of their intelligence can be measured as the difference from the complete search. In order to shorten the search, researchers develop various algorithms to control the inference chaining. In particular, the author has previously proposed a technique to control the course of forward chaining in intelligence systems with discrete domains of variables by means of heuristic indicators using certain subsets of these domains. However, it was a unidirectional chaining which made it hard to accelerate the inference by proper control of its direction and conflict resolution. In this paper, a similar set-theory approach is extended to organize combined inference and conflict resolution with the view of shortening the variant search for inference chaining. **Results:** A dynamic control strategy is developed for combined deterministic and probabilistic inference in discrete intelligence production systems, analyzing the structure of consequences from the productions included in the conflict set and comparing it with the structure of goal premises in order to find a production able to confirm as solidly as possible that the current goal is true. Dynamic strategies are known to provide more flexibility than built-in ones in which the course of choosing is predefined a priori. The proposed approach to representing and analyzing the information in intelligent systems differs from the existing ones, as it rapidly takes into account the internal structure of the system data and knowledge. This helps to increase the inference speed in a discrete intellectual system. **Practical relevance:** In flexible discrete systems, the introduced rules of control over production application can help to provide that inference goals are reached faster, whether the information in the system is determinate, stochastic or fuzzy.

Keywords — Discrete Intelligence System, Combined Inference, Control Over Production Application.

References

1. Waterman D. *A Guide to Expert Systems*. Addison-Wesley Publ., 1985. 419 p.
2. Fridman A. Ya., Kulik B. A., Kurbanov V. G. Course Indicators for Forward Logical Inference upon List Variables]. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2015, no. 1, pp. 29–34 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2015.1.29
3. Lauriere J.-L. *Intelligence Artificielle: Resolution de Probleme par l'Homme et la Machine*. Paris, Editons Eyrolles, 1987. 473 p. (In French).
4. Kulik B. A., Zuenko A. A., Fridman A. Ya. *Algebraicheskii podkhod k intellektual'noi obrabotke dannykh i znanii* [Algebraic Approach to Intelligent Processing of Data and Knowledge]. Saint-Petersburg, Politekhnikeskii universitet Publ., 2010. 235 p. (In Russian).
5. Kulik B. A., Zuenko A. A., Fridman A. Ya. New Aspects of Logical Inference: Growth of Uncertainty and Inductive Generalization. *Shestaia Vserossiiskaia multikonferentsiia po problemam upravleniia*, Rostov-na-Donu, IuFU Publ., 2013, vol. 1, pp. 34–39 (In Russian).
6. Marsellus D. *Expert Systems Programming in Turbo Prolog*. Prentice Hall Publ., 1988. 266 p.
7. Darwiche A. *Modeling and Reasoning with Bayesian Networks*. Cambridge University Press, 2009. 526 p.
8. *Artificial Intelligence. A Modern Approach*. Second ed. S. Russel, P. Norvig (eds.). Prentice Hall Publ., 2003. 1081 p.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ МОДУЛЯ SEMS

А. Е. Городецкий^а, доктор техн. наук, профессор

И. Л. Тарасова^а, канд. техн. наук, доцент

В. Г. Курбанов^а, канд. физ.-мат. наук, доцент

В. А. Агапов^а, аспирант

^аИнститут проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, РФ

Постановка проблемы: использование в интеллектуальных роботах гексаподоподобных структур SEMS (умных электромеханических систем) дает возможность получить максимальную точность исполнительных механизмов при минимальном времени перемещения за счет введения параллелизма в процессы измерения, вычисления, перемещения и применения высокоточных пьезодвигателей, способных работать в экстремальных условиях, в том числе в открытом космосе. Основным элементом SEMS является универсальный модуль, обеспечивающий, в отличие от гексаподов, не только сдвиги и повороты верхней платформы, но и сжатие и расширение верхней и нижней платформ, что в совокупности с системами управления, измерения и стыковки обеспечивает его универсальность. Целью работы является построение математической модели системы автоматического управления универсального модуля SEMS, предназначенного для функционирования в условиях априорной неопределенности динамически изменяющейся внешней среды.

Результаты: описана структура универсального модуля, содержащего электромеханическую систему параллельного типа, систему автоматического управления, измерительную систему и систему стыковки. Ядром системы автоматического управления служит нейропроцессорная система автоматического управления, основной функцией которой является автоматическое управление перемещением верхней платформы, имеющей шестиосевую систему позиционирования с блоком управления, а также автоматическое управление сжатием и растяжением верхней и нижней платформ за счет удлинения трех управляемых стержней в каждой платформе. Построена математическая модель системы автоматического управления универсального модуля SEMS, которая содержит следующие блоки: вычисления удлинений, управления стержнями верхней платформы и нижней платформы, управления актуаторами ног, двигателей стержней верхней платформы и нижней платформы, двигателей актуаторов ног, редукторов стержней верхней платформы и нижней платформы, редукторов актуаторов ног, определения моментов и сил сопротивления и вычисления координат платформы. Для каждого блока приведено математическое описание. При этом отмечено, что для получения параметров ряда блоков системы требуется проведение экспериментальных исследований. **Практическая значимость:** возможно применение универсальных модулей SEMS с рассмотренной нейропроцессорной системой автоматического управления в интеллектуальных робототехнических комплексах, медицинских микророботах, платформах орудийных и пусковых установок, опорно-поворотных устройствах антенн и др.

Ключевые слова — система автоматического управления, универсальный модуль, умная электромеханическая система, интеллектуальный робот, математическая модель.

Введение

Исследования по разработке интеллектуальных роботов (ИР), предназначенных для функционирования в условиях априорной неопределенности динамически изменяющейся внешней среды, активно ведутся во всех промышленно развитых странах мира. Сферы применения таких роботов обширны и разнообразны: автоматизированное производство, транспорт, домашнее хозяйство, медицина, космос, оборона, подводные исследования, спасательные и ремонтно-восстановительные работы в экстремальных условиях и т. п. Во многих из них присутствие человека нежелательно или вообще невозможно. Поэтому для успешного выполнения рабочих операций ИР, подобно высокоразвитым живым существам, должны обладать таким важным качеством, как приспособляемость к неформализованной изменяющейся рабочей среде [1]. Последнее предполагает решение с помощью системы управления ИР ряда сложных проблем.

В первую очередь, это проблемы адекватного восприятия и распознавания внешней среды, целенаправленного планирования поведения и эффективного исполнения спланированных действий. Последняя проблема достаточно успешно решается методами теории автоматического управления с использованием ЭВМ традиционной архитектуры с последовательным принципом обработки информации. Решение первых двух проблем на тех же вычислительных средствах связано со значительными трудностями. Причиной этого является не только необходимость обработки больших объемов информации от распределенных в пространстве и параллельно функционирующих датчиков в реальном масштабе времени, но и применение новых интеллектуальных способов обработки информации, на которые эти ЭВМ не ориентированы [2].

Кроме того, использование в ИР гексаподоподобных структур умных электромеханических систем (Smart ElectroMechanical Systems — SEMS) дает возможность получить максимальную точ-

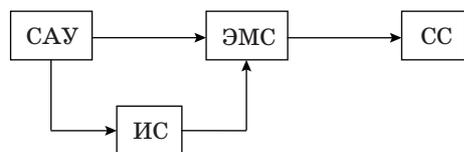
ность исполнительных механизмов при минимальном времени перемещения за счет введения параллелизма в процессы измерения, вычисления, перемещения и использования высокоточных пьезодвигателей, способных работать в экстремальных условиях, в том числе в открытом космосе [3, 4]. Разнообразные объединения (последовательные, параллельные, древовидные и др.) структур SEMS позволяют легко конструировать новые ИП с более широкими технологическими возможностями (облегчение конструкций, совмещение в одном механизме транспортных и технологических операций, гибкость конструкций и т. д.). Вместе с тем такие механизмы обладают более сложной кинематической схемой, что требует более развитых алгоритмов управления и решения новых, сложных оптимизационных задач, обеспечивающих реализацию оптимальных траекторий движений без заклиниваний. Помимо этого включение в SEMS беспроводного сетевого интерфейса типа Wi-Fi и интеллектуальной системы стратегического планирования кооперативного поведения нескольких SEMS еще больше расширит область применения ИП [5].

Основным элементом SEMS является универсальный модуль (Universal Module — UM), обеспечивающий, в отличие от гексаподов, не только сдвиги и повороты верхней платформы, но и сжатие и расширение верхней и нижней платформ, что в совокупности с системами управления, измерения и стыковки обеспечивает его универсальность.

Структура UM SEMS

Универсальный модуль содержит (рис. 1) электромеханическую систему ЭМС параллельного типа, систему автоматического управления САУ, измерительную систему ИС и систему стыковки СС.

Ядром САУ является нейропроцессорная система автоматического управления (НСАУ), основной функцией которой является автоматическое управление перемещением верхней платформы, имеющей шестиосевую систему позиционирования с блоком управления, а также автоматическое управление сжатием и растяжением верхней и нижней платформ за счет удлинения трех управляемых стержней в каждой платформе. При этом используются шесть независимых



■ Рис. 1. Структура UM SEMS

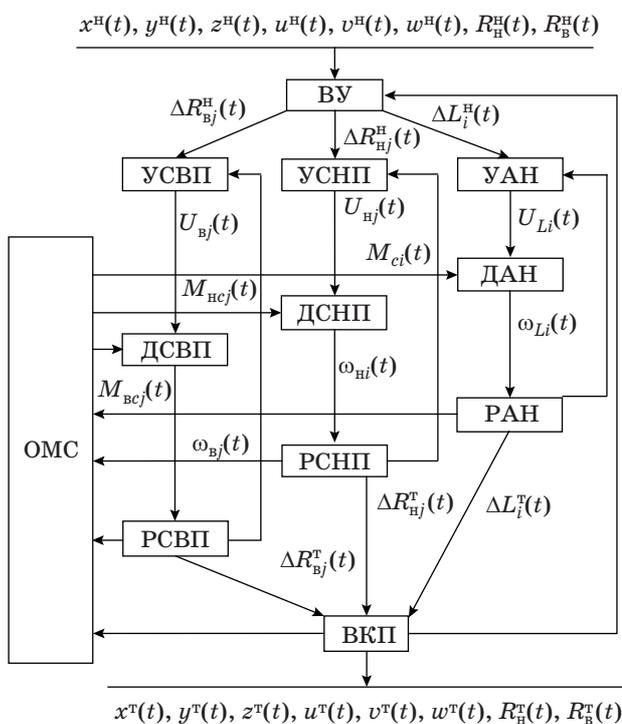
прецизионных двигателей в ногах, благодаря чему можно проводить позиционирование по трем линейным (X, Y, Z) и трем угловым координатам (вращение вокруг соответствующих осей Qx, Qy, Qz) [4], и шесть независимых прецизионных двигателей в управляемых стержнях, обеспечивающих изменение радиусов платформ (ΔR_B и ΔR_H).

Нейропроцессорная САУ содержит ЭМС, имеющую раздвижные неподвижную и подвижную платформы, шесть ног, а также УВМ на базе нейропроцессора, например NM 6403, ИС и программный комплекс.

Структура математической модели САУ UM SEMS без учета заклинивания

Структура математической модели САУ UM SEMS (рис. 2) содержит следующие блоки: вычисления удлинений ВУ, управления стержнями верхней платформы УСВП и нижней платформы УСНП, управления актуаторами ног УАН, двигателей стержней верхней платформы ДСВП и нижней платформы ДСНП, двигателей актуаторов ног ДАН, редукторов стержней верхней платформы РСВП и нижней платформы РСНП, редукторов актуаторов ног РАН, определения моментов и сил сопротивления ОМС и вычисления координат платформы ВКП.

Для вычисления координат платформы блока ВКП необходимо определить разность между рас-



■ Рис. 2. Структура математической модели САУ UM SEMS

считанными по заданным и текущим координатам длин ног:

$$\Delta L_i^x(t) = L_i^x(t) - L_i^x(t), \quad (1)$$

где $L_i^x(t) = L_i(x^H(t), y^H(t), z^H(t), u^H(t), v^H(t), w^H(t), R_B^H(t), R_H^H(t))$ — рассчитанные по заданным координатам длины ног;

$L_i^T(t) = L_i(x^T(t), y^T(t), z^T(t), u^T(t), v^T(t), w^T(t), R_B^T(t), R_H^T(t))$ — взятые из блока ВКП текущие величины длин ног;

$x^H(t), y^H(t), z^H(t)$ и $x^T(t), y^T(t), z^T(t)$ — заданные и текущие значения линейных координат верхней платформы;

$u^H(t), v^H(t), w^H(t)$ и $u^T(t), v^T(t), w^T(t)$ — заданные и текущие значения угловых координат верхней платформы;

$R_B^H(t), R_H^H(t)$ и $R_B^T(t), R_H^T(t)$ — заданные и текущие значения радиусов верхней и нижней платформ.

Длины ног L_i вычисляются через компоненты радиуса векторов r_{iB} и r_{iH} верхней и нижней платформ по формуле

$$\begin{aligned} L_i(x, y, z, u, v, w, \Delta R_B, \Delta R_H) = & \\ = (r_{iB}^x(x, y, z, u, v, w, \Delta R_B) - r_{iH}^x(\Delta R_H))^2 + & \\ + (r_{iB}^y(x, y, z, u, v, w, \Delta R_B) - r_{iH}^y(\Delta R_H))^2 + & \\ + (r_{iB}^z(x, y, z, u, v, w, \Delta R_B) - r_{iH}^z(\Delta R_H))^2)^{1/2}. \quad (2) \end{aligned}$$

При этом радиусы векторов верхней и нижней платформ определяются по следующим формулам:

$$\begin{aligned} r_{iB}(x, y, z, u, v, w, \Delta R_B) = & \\ = C_u C_v C_w (r_{iB}(0) + A + B_{iB}(t)); \quad (3) \end{aligned}$$

$$r_{iH}(\Delta R_H) = (r_{iH}(0) + B_{iH}(t)), \quad (4)$$

где r_{iB} — вектор, направленный из точки O в точку iB (рис. 3); r_{iH} — вектор, направленный из точки O_1 в точку iH (см. рис. 3); $A = /x(t); y(t); z(t)^T$ — матрица смещений; $B_{iB}(t)$ — матрица сжатий верхней платформы:

$$B_{1B}(t) = /\Delta R_B(t)\sin(\varphi_B); \Delta R_B(t)\cos(\varphi_B); 0/T; \quad (5)$$

$$\begin{aligned} B_{2B}(t) = /\Delta R_B(t)\sin(\varphi_B + \Delta\varphi_B); & \\ \Delta R_B(t)\cos(\varphi_B + \Delta\varphi_B); 0/T; \quad (6) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B_{3B}(t) = /\Delta R_B(t)\sin(\varphi_B + 30^\circ); & \\ \Delta R_B(t)\cos(\varphi_B + 30^\circ); 0/T; \quad (7) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B_{4B}(t) = /\Delta R_B(t)\sin(\varphi_B + \Delta\varphi_B + 30^\circ); & \\ \Delta R_B(t)\cos(\varphi_B + \Delta\varphi_B + 30^\circ); 0/T; \quad (8) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B_{5B}(t) = /\Delta R_B(t)\sin(\varphi_B + 60^\circ); & \\ \Delta R_B(t)\cos(\varphi_B + 60^\circ); 0/T; \quad (9) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B_{6B}(t) = /\Delta R_B(t)\sin(\varphi_B + \Delta\varphi_B + 30^\circ); & \\ \Delta R_B(t)\cos(\varphi_B + \Delta\varphi_B + 30^\circ); 0/T; \quad (10) \end{aligned}$$

$B_{iH}(t)$ — матрица сжатий нижней платформы:

$$B_{1H}(t) = /\Delta R_H(t)\sin(\varphi_H); \Delta R_H(t)\cos(\varphi_H); 0/T; \quad (11)$$

$$\begin{aligned} B_{2H}(t) = /\Delta R_H(t)\sin(\varphi_H + \Delta\varphi_H); & \\ \Delta R_H(t)\cos(\varphi_H + \Delta\varphi_H); 0/T; \quad (12) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B_{3H}(t) = /\Delta R_H(t)\sin(\varphi_H + 30^\circ); & \\ \Delta R_H(t)\cos(\varphi_H + 30^\circ); 0/T; \quad (13) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B_{4H}(t) = /\Delta R_H(t)\sin(\varphi_H + \Delta\varphi_H + 30^\circ); & \\ \Delta R_H(t)\cos(\varphi_H + \Delta\varphi_H + 30^\circ); 0/T; \quad (14) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B_{5H}(t) = /\Delta R_H(t)\sin(\varphi_H + 60^\circ); & \\ \Delta R_H(t)\cos(\varphi_H + 60^\circ); 0/T; \quad (15) \end{aligned}$$

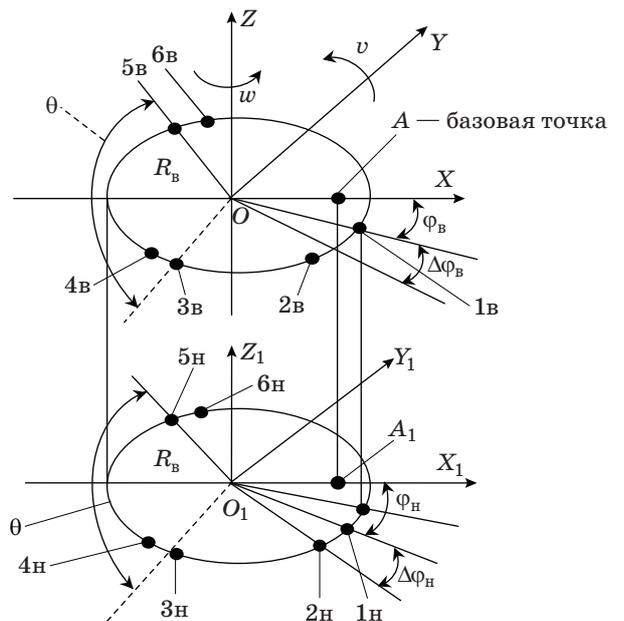
$$\begin{aligned} B_{6H}(t) = /\Delta R_H(t)\sin(\varphi_H + \Delta\varphi_H + 30^\circ); & \\ \Delta R_H(t)\cos(\varphi_H + \Delta\varphi_H + 30^\circ); 0/T; \quad (16) \end{aligned}$$

C_u, C_v, C_w — матрицы поворота:

$$C_u = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(u(t)) & -\sin(u(t)) \\ 0 & \sin(u(t)) & \cos(u(t)) \end{vmatrix}; \quad (17)$$

$$C_v = \begin{vmatrix} \cos(v(t)) & 0 & \sin(v(t)) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(v(t)) & 0 & \cos(v(t)) \end{vmatrix}; \quad (18)$$

$$C_w = \begin{vmatrix} \cos(w(t)) & -\sin(w(t)) & 0 \\ \sin(w(t)) & \cos(w(t)) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}. \quad (19)$$



■ Рис. 3. Схема ЭМС

Для более полного понимания функционирования математической модели САУ UM SEMS рассмотрим математическое описание входящих в нее блоков.

Математическое описание блоков

Блоки УСВП, УСНП и УАН

Блок УСВП в соответствии с поступающим заданием $\Delta R_{Bj}^H(t)$ вычисляет управляющие воздействия $U_{Bj}(t)$, подаваемые на двигатели стержней верхней платформы. Обычно [6] используется пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) закон управления

$$U_{Bj}(t) = k_{1B}e_{Bj}(t) + k_{2B} \int e_{Bj}(t)dt + k_{3B} \frac{de_{Bj}(t)}{dt},$$

где $e_{Bj}(t) = (\Delta R_{Bj}^H(t) - \Delta R_{Bj}^T(t))$ — отклонения от задания; k_{1B} , k_{2B} и k_{3B} — коэффициенты, определяющие характер переходного процесса в системе, значения которых устанавливаются в процессе настройки системы или ее компьютерной модели.

Блок УСНП в соответствии с поступающим заданием $\Delta R_{Hj}^3(t)$ вычисляет управляющие воздействия $U_{Hj}(t)$, подаваемые на двигатели стержней нижней платформы. Здесь обычно аналогично используется ПИД-закон управления

$$U_{Hj}(t) = k_{1H}e_{Hj}(t) + k_{2H} \int e_{Hj}(t)dt + k_{3H} \frac{de_{Hj}(t)}{dt}.$$

Блок УАН в соответствии с поступающим заданием $\Delta L_i^3(t)$ вычисляет управляющие воздействия $U_{Li}(t)$, подаваемые на двигатели актуаторов ног. В этом блоке также обычно используется ПИД-закон управления

$$U_{Li}(t) = k_{1L}e_{Li}(t) + k_{2L} \int e_{Li}(t)dt + k_{3L} \frac{de_{Li}(t)}{dt}.$$

Блоки ДСВП, ДСНП и ДАН

Блоки ДСВП и ДСНП каждый содержат по три двигателя стержней, а блок ДАН содержит шесть двигателей актуаторов. Чаще всего [7] используются двигатели постоянного тока, которые описываются следующими уравнениями:

$$L_{я} di(t)/dt + R_{я} i(t) = U(t) - C_e \omega(t);$$

$$J d\omega(t)/dt = C_M i(t) - M_c(t),$$

где $L_{я}$ и $R_{я}$ — индуктивность и активное сопротивление якорной цепи; J — приведенный момент инерции ротора; C_e и C_M — постоянные, зависящие от конструктивных параметров двигателя и величины потока возбуждения; $i(t)$ — сила тока в якорной обмотке; $\omega(t)$ — скорость вращения ротора; $U(t)$ — входное воздействие; $M_c(t)$ — приведенный момент нагрузки на валу двигателя.

Блоки РСВП, РСНП и РАН

Блоки РСВП и РСНП каждый содержат по три редуктора, а блок РАН — шесть. Их можно описать следующим дифференциальным уравнением:

$$k_p dl(t)/dt = \omega(t),$$

где k_p — коэффициент редукции (верхней и нижней платформ или актуатора); $l(t)$ — удлинение стержней верхней платформы ($\Delta R_{Bj}^T(t)$), нижней платформы ($\Delta R_{Hj}^T(t)$) или ног ($\Delta L_i^T(t)$).

Блок ВКП

Перемещение Δl_k мест крепления стержней и шарниров ног на платформах в зависимости от удлинений Δl_c стержней верхней платформы ($\Delta R_{Bj}^T(t)$), нижней платформы ($\Delta R_{Hj}^T(t)$) или ног ($\Delta L_i^T(t)$) определяется следующим дифференциальным уравнением [8]:

$$T_i^2 \frac{d^2 \Delta l_{ki}}{dt^2} + 2T_i \xi_i \frac{d \Delta l_{ki}}{dt} + 1 = k_i \Delta l_{ci}, \quad (20)$$

где T_i — постоянная времени; ξ_i — колебательность; k_i — усиление.

Величины T_i , ξ_i и k_i зависят от конструктивных параметров ЭМС и могут быть определены по результатам экспериментов. При $\xi_i \geq 1$ колебательное звено (20) заменяется двумя апериодическими.

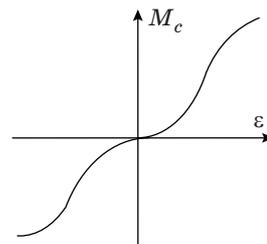
Для определения линейных (x, y, z) и угловых (u, v, w) координат платформы по известным перемещениям Δl_k необходимо, используя уравнения вида (1)–(19), решить обратную задачу. Это можно осуществить алгоритмически, используя метод Ньютона.

Блок ОМС

В памяти блока ОМС хранятся экспериментально снятые зависимости приведенных моментов нагрузки на валу двигателей $M_c(M_{всj}(t), M_{нсj}(t))$ или $M_{ci}(t)$ от величины отклонения $\varepsilon = \Delta l_k - \Delta l_c$.

Эта зависимость имеет вид, показанный на рис. 4.

Для каждого места крепления стержней и шарниров ног в блоке ОМС вычисляются величины отклонений $\varepsilon_j(t)$ или $\varepsilon_i(t)$. По ним из памя-



■ **Рис. 4.** Зависимость приведенного момента нагрузки на валу двигателя от отклонения удлинения от места крепления

ти ОМС выбираются значения $M_{всj}(t)$, $M_{нсj}(t)$ или $M_{ci}(t)$, которые подаются в блоки УСВП, УСНП или ДАН.

Заключение

В статье приведены структура системы автоматического управления универсального модуля SEMS с параллельными каналами управления, измерения и перемещения, а также простые математические модели блоков этой системы. При этом не учитываются различные заклинивания

ног и управляемых стержней электромеханической системы, связанные с возможной несинхронной работой электроприводов. Для учета заклинивания можно провести логический анализ перемещений и решить задачу выбора оптимальной траектории движения. В этом случае система управления должна быть снабжена дополнительными программными вычислительными блоками или датчиками усилий в ногах и управляемых стержнях. При этом структура системы управления усложнится, но ее качество и надежность увеличатся.

Литература

1. Попов Е. П., Письменный Г. В. Основы робототехники. — М.: Высш. шк., 1990. — 224 с.
2. Чернухин Ю. В., Писаренко С. Н. Алгоритм адаптивной экстраполяции для нейросетевых систем управления автономных мобильных роботов // Оптическая память и нейронные сети. 2002. Т. 11. № 11. С. 105–115.
3. Пат. РФ № 2469752, МПК А61М37/00 (2006.01). Медицинский микроробот/ В. А. Агапов (РФ), А. Е. Городецкий (РФ), А. Ю. Кучмин (РФ), Е. Н. Селиванова (РФ). — № 2011120517/14; заявл. 20.05.2011; опубл. 20.12.2012, Бюл. № 35. — 7 с.
4. Мерлет Д. П. Параллельные роботы. Второе изд. Инрия, София-антиполис, Франция: Springer, 2006. — 383 с.
5. Городецкий А. Е. Основы теории интеллектуальных систем управления. — Berlin: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011. — 314 с.
6. Городецкий А. Е., Тарасова И. Л. Управление и нейронные сети. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2005. — 312 с.
7. Артеменко Ю. Н. и др. Особенности выбора электроприводов зеркальной системы космических радиотелескопов / Ю. Н. Артеменко А. Е. Городецкий, М. С. Дорошенко, А. С. Коновалов, А. Ю. Кучмин, В. В. Дубаренко, И. Л. Тарасова // Мехатроника, автоматизация, управление. 2012. № 1. С. 26–31.
8. Артеменко Ю. Н., Агапов В. А., Дубаренко В. В., Кучмин А. Ю. Групповое управление актуаторами контррефлектора радиотелескопа // Информационно-управляющие системы. 2012. № 4(59). С. 2–9.

UDC 519.7, 681.5

doi:10.15217/issn1684-8853.2015.3.40

Mathematical Model of Automatic Control System for SEMS Module

Gorodetskiy A. E.^a, Dr. Sc., Tech., Professor, g27764@yandex.ru

Tarasova I. L.^a, PhD, Tech., Associate Professor, g172651@yandex.ru

Kurbanov V. G.^a, PhD, Math., Associate Professor, vugarborchali@icloud.com

Agapov V. A.^a, Post-Graduate Student, agapov1989@mail.ru

^aInstitute of Problems of Mechanical Engineering of RAS, 61, Bolshoi Pr. V. O., 199178, Saint-Petersburg, Russian Federation

Purpose: Using hexapod-like structures called SEMS (smart electromechanical systems) in intelligent robots makes it possible to obtain the best possible precision for their actuators while keeping their travel time very small by introducing parallelism into the measurement, calculation, movement and use of high-precision ultrasonic motors able to work in extreme conditions, including open space. The main element of SEMS is a Universal Module which provides, unlike hexapods, not only translations and rotations of the upper platform, but also compression and expansion of the upper and lower platforms. This feature, combined with the systems of control, measurement and docking, provides a high degree of versatility. The goal of this paper is building a mathematical model for SEMS Universal Module automatic control system when this module is supposed to operate in a dynamically changing environment under a priori uncertainty conditions. **Results:** The structure has been described for the Universal Module containing a parallel electromechanical system, an automatic control system, a measuring system and a docking system. The core of the automatic control system is a neuroprocessor automatic control system whose main function is controlling the movement of the upper platform with a 6-axis point-to-point motion system with a controller, and controlling the compression and expansion of the upper and lower platforms by lengthening three control rods in each platform. For the automatic control system of SEMS Universal Module, a mathematical model has been built which contains blocks for calculating the extensions, controlling the rods of the upper and lower platform, controlling the feet actuators, rod motors for the upper and lower platforms, feet actuator motors, rod gears for the upper and lower platforms, feet actuator gears, detecting the moments and forces of resistance and calculating the coordinates of the platform. For each block, a mathematical description is given. To obtain the parameters of certain blocks, experiments are still necessary. **Practical relevance:** SEMS Universal Modules with the discussed neuroprocessor automatic control system can be used in intelligent robotics systems, medical microrobots, platforms of launchers or artillery mounts, antenna positioning mounts, etc.

Keywords — Automatic Control System, Universal Module, Smart Electromechanical System, Intelligent Robot, Mathematical Model.

References

1. Popov E. P., Pis'mennyi G. V. *Osnovy robototekhniki* [Fundamentals of Robotics]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1990. 224 p. (In Russian).
2. Chernukhin Y. V., Pisarenko S. N. Extrapolation Structures in Neural Network-Based Control Systems for Intelligent Mobile Robots. *Opticheskaya pamiat' i neironnye seti*, 2002, vol. 11, no. 2, pp. 105–115 (In Russian).
3. Agapov V. A., et al. *Meditsinskii mikrorobot* [Medical Microrobot]. Patent RU, no. 2469752, 2011.
4. Merlet J. P. *Parallel Robots*. Second Ed. Inria, Sophia-Antipolis, France, Springer Publ., 2006. 383 p.
5. Gorodetsky A. E. *Osnovy teorii intellektual'nykh sistem upravleniya* [Fundamentals of the Theory of Intelligent Control Systems]. Berlin, LAP LAMBERT Academic Publ., 2011. 314 p. (In Russian).
6. Gorodetsky A. E., Tarasova I. L. *Upravlenie i neironnye seti* [Control and Neural Networks]. Saint-Petersburg, Politehnicheskii universitet Publ., 2005. 312 p. (In Russian).
7. Artemenko Yu. N., Gorodetsky A. E., Doroshenko M. S., Konovalov A. S., Kuchmin A. Yu., Tarasova I. L. Problems of the Choice of Electric Drives of Space Radio-Telescope System Dish System. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2012, no. 1, pp. 26–31 (In Russian).
8. Artemenko Y. N., Agapov V. A., Dubarenko V. V., Kuchmin A. Y. Co-operative Control of Subdish Actuators of Radio-Telescope. *Informatsionno-upravliayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2012, no. 4(59), pp. 2–9 (In Russian).

Уважаемые авторы!

При подготовке рукописей статей необходимо руководствоваться следующими рекомендациями.

Статьи должны содержать изложение новых научных результатов. Название статьи должно быть кратким, но информативным. В названии недопустимо использование сокращений, кроме самых общепринятых (РАН, РФ, САПР и т. п.).

Объем статьи (текст, таблицы, иллюстрации и библиография) не должен превышать эквивалента в 20 страниц, напечатанных на бумаге формата А4 на одной стороне через 1,5 интервала Word шрифтом Times New Roman размером 13, поля не менее двух сантиметров.

Обязательными элементами оформления статьи являются: индекс УДК, заглавие, инициалы и фамилия автора (авторов), ученая степень, звание (при отсутствии — должность), полное название организации, аннотация и ключевые слова на русском и английском языках, электронные адреса авторов, которые по требованию ВАК должны быть опубликованы на страницах журнала. При написании аннотации не используйте аббревиатур и не делайте ссылок на источники в списке литературы.

Статьи авторов, не имеющих ученой степени, рекомендуется публиковать в соавторстве с научным руководителем, наличие подписи научного руководителя на рукописи обязательно; в случае самостоятельной публикации обязательно предоставляйте заверенную по месту работы рекомендацию научного руководителя с указанием его фамилии, имени, отчества, места работы, должности, ученого звания, ученой степени — эта информация будет опубликована в ссылке на первой странице.

Формулы набирайте в Word, не используя формульный редактор (Mathtype или Equation), при необходимости можно использовать формульный редактор; для набора одной формулы не используйте два редактора; при наборе формул в формульном редакторе знаки препинания, ограничивающие формулу, набирайте вместе с формулой; для установки размера шрифта никогда не пользуйтесь вкладкой Other..., используйте заводские установки редактора, не подгоняйте размер символов в формулах под размер шрифта в тексте статьи, не растягивайте и не сжимайте мышью формулы, вставленные в текст; в формулах не отделяйте пробелами знаки: + = -.

Для набора формул в Word никогда не используйте Конструктор (на верхней панели: «Работа с формулами» — «Конструктор»), так как этот ресурс предназначен только для внутреннего использования в Word и не поддерживается программами, предназначенными для изготовления оригинал-макета журнала.

При наборе символов в тексте помните, что символы, обозначаемые латинскими буквами, набираются светлым курсивом, русскими и греческими — светлым прямым, векторы и матрицы — прямым полужирным шрифтом.

Иллюстрации в текст не завершаются и предоставляются отдельными исходными файлами, поддающимися редактированию:

— рисунки, графики, диаграммы, блок-схемы предоставляйте в виде отдельных исходных файлов, поддающихся редактированию, используя векторные программы: Visio 4, 5, 2002–2003 (*.vsd); Coreldraw (*.cdr); Excel (*.xls); Word (*.doc); AdobeIllustrator (*.ai); AutoCad (*.dxf); Matlab (*.ps, *.pdf или экспорт в формат *.ai);

— если редактор, в котором Вы изготавливаете рисунок, не позволяет сохранить в векторном формате, используйте функцию экспорта (только по отношению к исходному рисунку), например, в формат *.ai, *.esp, *.wmf, *.emf, *.svg;

— фото и растровые — в формате *.tif, *.png с максимальным разрешением (не менее 300 pixels/inch).

Наличие подрисовочных подписей обязательно (желательно не повторяющих дословно комментарии к рисункам в тексте статьи).

В редакцию предоставляются:

— сведения об авторе (фамилия, имя, отчество, место работы, должность, ученое звание, учебное заведение и год его окончания, ученая степень и год защиты диссертации, область научных интересов, количество научных публикаций, домашний и служебный адреса и телефоны, e-mail), фото авторов: анфас, в темной одежде на белом фоне, должны быть видны плечи и грудь, высокая степень четкости изображения без теней и отблесков на лице, фото можно представить в электронном виде в формате *.tif, *.png с максимальным разрешением — не менее 300 pixels/inch при минимальном размере фото 40×55 мм;

— экспертное заключение.

Список литературы составляется по порядку ссылок в тексте и оформляется следующим образом:

— для книг и сборников — фамилия и инициалы авторов, полное название книги (сборника), город, издательство, год, общее количество страниц;

— для журнальных статей — фамилия и инициалы авторов, полное название статьи, название журнала, год издания, номер журнала, номера страниц;

— ссылки на иностранную литературу следует давать на языке оригинала без сокращений;

— при использовании web-материалов указывайте адрес сайта и дату обращения.

Список литературы оформляйте двумя отдельными блоками по образцам lit.dot на сайте журнала (<http://i-us.ru/paperrules>) по разным стандартам: Литература — СИБИД РФ, References — один из мировых стандартов.

Более подробно правила подготовки текста с образцами изложены на нашем сайте в разделе «Оформление статей».

Контакты

Куда: 190000, Санкт-Петербург,
Б. Морская ул., д. 67, ГУАП, РИЦ

Кому: Редакция журнала «Информационно-управляющие системы»

Тел.: (812) 494-70-02

Эл. почта: ius.spb@gmail.com

Сайт: www.i-us.ru

АДАПТИВНЫЙ ПРИЕМ ЧАСТОТНО-МОДУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ С НЕИЗВЕСТНЫМ ЗАКОНОМ МОДУЛЯЦИИ

А. Н. Цыбульник^а, канд. техн. наук, профессор

Н. А. Лешко^б, канд. техн. наук, доцент

^аФилиал Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского, Ярославль, РФ

^бВоенно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, РФ

Постановка проблемы: обнаружение воздушных объектов с использованием постороннего источника подсвета вызывает необходимость обеспечения согласованного приема сигналов с априорно неизвестными параметрами. Методы приема сигналов в условиях априорной параметрической неопределенности приводят к адаптивным алгоритмам.

Цель: получение алгоритмов совместного обнаружения и оценивания неизвестных параметров сигнала, представляющего собой аддитивную смесь частотно-модулированного сигнала с неизвестным значением несущей частоты, изменяющейся крутизной частотной модуляции, случайным отклонением фазы и частоты и белого шума. **Результаты:** с использованием уравнений нелинейного обнаружения и оценивания для предложенной модели сигнала получены алгоритмы работы и реализующая их структура оценочно-корреляционного приемного устройства, в котором можно выделить блок нелинейной фильтрации и блок обнаружения. По мере уточнения оценок неизвестных параметров перестраиваемый гетеродин подстраивается под сигнал, содержащийся во входном колебании.

Ключевые слова — априорная неопределенность, адаптация, частотно-модулированный сигнал, алгоритмы обнаружения и оценивания.

Введение

В настоящее время достаточно интенсивно исследуются методы и средства получения радиолокационной информации путем анализа прямых и отраженных от воздушных объектов сигналов посторонних радиоэлектронных средств [1–5]. Применение таких средств обеспечивает скрытность работы при получении информации о воздушной обстановке, а следовательно, приводит к повышению живучести информационных систем.

Используя посторонние источники подсвета для обнаружения воздушных объектов, необходимо добиться согласованного приема отраженных от целей сигналов с априорно неизвестными параметрами. Методы приема сигналов в условиях априорной неопределенности приводят к адаптивным алгоритмам [6–8].

Алгоритмы оптимального обнаружения и фильтрации параметров сигнала

Учитывая широту применения в радиолокации частотно-модулированных сигналов [9, 10] и предполагая число их неизвестных параметров конечным, на основе марковской теории нелинейной фильтрации [7] получим уравнения нелинейного оценивания и обнаружения для принимаемой на интервале времени $[0, t]$ реализации

$$y(t) = \begin{cases} S[\phi(t), t] + n(t), & Q = 1; \\ n(t), & Q = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где $\phi(t)$ — фаза сигнала; Q — параметр, характеризующий наличие или отсутствие сигнала.

Сигнал (1) представляет собой аддитивную смесь частотно-модулированного сигнала $S[\phi(t), t]$ с неизвестным значением несущей частоты, изменяющейся крутизной частотной модуляции, случайным отклонением фазы и частоты и шума, являющегося нормальным стационарным белым шумом с нулевым средним значением и дельта-функцией корреляции

$$\langle n(t) \rangle = 0;$$

$$\langle n(t_1)n(t_2) \rangle = \frac{1}{2}N_0\delta(t_2 - t_1).$$

В этом случае изменения фазы и частоты сигнала описываются системой линейных стохастических дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} \dot{\phi}(t) = n_1 + \Omega(t) + n_\phi(t) \\ \dot{\Omega}(t) = \gamma - \Delta\gamma\Omega(t) + n_\Omega(t) \end{cases} \quad (2)$$

где $\Omega(t)$ — частота сигнала, являющаяся случайным процессом; n_1 — случайная величина, характеризующая начальное значение частоты сигнала; $\Delta\gamma$ — постоянный коэффициент, не зависящий от времени и характеризующий ширину спектра изменения параметра $\Omega(t)$; γ — коэффициент, характеризующий начальное значение скорости частотной модуляции; n_ϕ, n_Ω — взаимно независимые белые гауссовы шумы, описывающие текущие отклонения фазы и частоты соответственно.

Фаза сигнала $\phi(t)$ является двумерным марковским процессом, характеризующимся коэффициентами переноса

$$A = \begin{bmatrix} a_\phi & a_\Omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Omega + n_1 & \gamma - \Delta\gamma\Omega \end{bmatrix} \quad (3)$$

и диффузии

$$B = \begin{bmatrix} b_{\phi\phi} & b_{\Omega\phi} \\ b_{\phi\Omega} & b_{\Omega\Omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{N_\phi}{2} + D_{n_1} & 0 \\ 0 & \frac{N_\Omega}{2} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Здесь и далее для сокращения записи индекс t (зависимость от времени) опущен.

Раскладывая функции a_ϕ , a_Ω в ряд Тейлора в окрестности их математических ожиданий, получим

$$A = \begin{bmatrix} m_\Omega + m_{n_1} & m_\gamma - m_{\Delta\gamma}m_\Omega \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Конкретизируя уравнения нелинейного оценивания и обнаружения [6]

$$\begin{aligned} \dot{K}_{ij} = & \sum_{q=1}^{u+l} K_{jq} \frac{\partial a_i}{\partial x_q} + \sum_{q=1}^{u+l} K_{iq} \frac{\partial a_j}{\partial x_q} + b_{ij} + \\ & + \frac{1}{N} (y(t) - S) \sum_{q,p=1}^u K_{iq} K_{jp} \frac{\partial^2 S}{\partial x_q \partial x_p} - \\ & - \frac{1}{N} \sum_{q,p=1}^u K_{iq} K_{jp} \frac{\partial S}{\partial x_q} \frac{\partial S}{\partial x_p}; \end{aligned} \quad (6)$$

$$\dot{m}_i = a_i + \frac{1}{N} (y(t) - S) \sum_{q=1}^u K_{iq} \frac{\partial S}{\partial x_q}; \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \dot{z} = & \frac{y(t)}{N} \left(S + \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^u K_{ij} \frac{\partial^2 S}{\partial x_i \partial x_j} \right) - \\ & - \frac{1}{2N} \left[S^2 + \sum_{i,j=1}^u K_{ij} \left(S \frac{\partial^2 S}{\partial x_i \partial x_j} + \frac{\partial S}{\partial x_i} \frac{\partial S}{\partial x_j} \right) \right] \end{aligned} \quad (8)$$

применительно к сигналу вида (1), получим

$$\begin{aligned} \dot{m}_\phi &= m_\Omega + m_{n_1} + \frac{A_0}{N} y(t) K_{\phi\phi} \cos[m_\phi(t)]; \\ \dot{m}_\Omega &= m_\gamma - m_{\Delta\gamma}m_\Omega + \frac{A_0}{N} y(t) K_{\Omega\phi} \cos[m_\phi(t)]; \\ \dot{m}_{n_1} &= \frac{A_0}{N} y(t) K_{n_1\phi} \cos[m_\phi(t)]; \\ \dot{m}_\gamma &= \frac{A_0}{N} y(t) K_{\gamma\phi} \cos[m_\phi(t)]; \\ \dot{m}_{\Delta\gamma} &= \frac{A_0}{N} y(t) K_{\Delta\gamma\phi} \cos[m_\phi(t)]; \\ \dot{K}_{\phi\phi} &= 2K_{\phi\Omega} + \frac{N_\phi}{2} + D_{n_1} - \frac{A_0}{N} y(t) K_{\phi\phi}^2 \sin[m_\phi(t)]; \\ \dot{K}_{\phi\Omega} &= K_{\Omega\Omega} + K_{\Omega n_1} - K_{\phi\Omega} m_{\Delta\gamma} + K_{\phi\gamma} - K_{\phi\Delta\gamma} m_\Omega - \\ & - \frac{A_0}{N} y(t) K_{\phi\phi} K_{\Omega\phi} \sin[m_\phi(t)]; \end{aligned} \quad (9)$$

$$\dot{K}_{\phi\gamma} = K_{\gamma n_1} + K_{\gamma\Omega} - \frac{A_0}{N} y(t) K_{\phi\phi} K_{\gamma\phi} \sin[m_\phi(t)];$$

$$\dot{K}_{\phi\Delta\gamma} = K_{\Delta\gamma n_1} + K_{\Delta\gamma\Omega} - \frac{A_0}{N} y(t) K_{\phi\phi} K_{\Delta\gamma\phi} \sin[m_\phi(t)];$$

$$\dot{K}_{\phi n_1} = K_{n_1\Omega} + K_{n_1 n_1} - \frac{A_0}{N} y(t) K_{\phi\phi} K_{n_1\phi} \sin[m_\phi(t)];$$

$$\begin{aligned} \dot{K}_{\Omega\Omega} &= 2K_{\Omega\gamma} - 2m_\Omega K_{\Omega\Delta\gamma} - 2m_{\Delta\gamma} K_{\Omega\Omega} + \\ & + \frac{N_\Omega}{2} - \frac{A_0}{N} y(t) K_{\Omega\phi}^2 \sin[m_\phi(t)]; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{K}_{\Omega\gamma} &= K_{\gamma\gamma} - K_{\gamma\Delta\gamma} m_\Omega - K_{\gamma\Omega} m_{\Delta\gamma} - \\ & - \frac{A_0}{N} y(t) K_{\gamma\phi} K_{\Omega\phi} \sin[m_\phi(t)]; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{K}_{\Omega\Delta\gamma} &= K_{\Delta\gamma\gamma} - K_{\Delta\gamma\Delta\gamma} m_\Omega - K_{\Delta\gamma\Omega} m_{\Delta\gamma} - \\ & - \frac{A_0}{N} y(t) K_{\Delta\gamma\phi} K_{\Omega\phi} \sin[m_\phi(t)]; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{K}_{\Omega n_1} &= K_{n_1\gamma} - K_{n_1\Delta\gamma} m_\Omega - K_{n_1\Omega} m_{\Delta\gamma} - \\ & - \frac{A_0}{N} y(t) K_{n_1\phi} K_{\Omega\phi} \sin[m_\phi(t)]; \end{aligned}$$

$$\dot{K}_{\gamma\gamma} = -\frac{A_0}{N} y(t) K_{\gamma\phi}^2 \sin[m_\phi(t)];$$

$$\dot{K}_{\gamma\Delta\gamma} = -\frac{A_0}{N} y(t) K_{\gamma\phi} K_{\Delta\gamma\phi} \sin[m_\phi(t)];$$

$$\dot{K}_{\gamma n_1} = -\frac{A_0}{N} y(t) K_{\gamma\phi} K_{n_1\phi} \sin[m_\phi(t)];$$

$$\dot{K}_{\Delta\gamma\Delta\gamma} = -\frac{A_0}{N} y(t) K_{\Delta\gamma\phi}^2 \sin[m_\phi(t)];$$

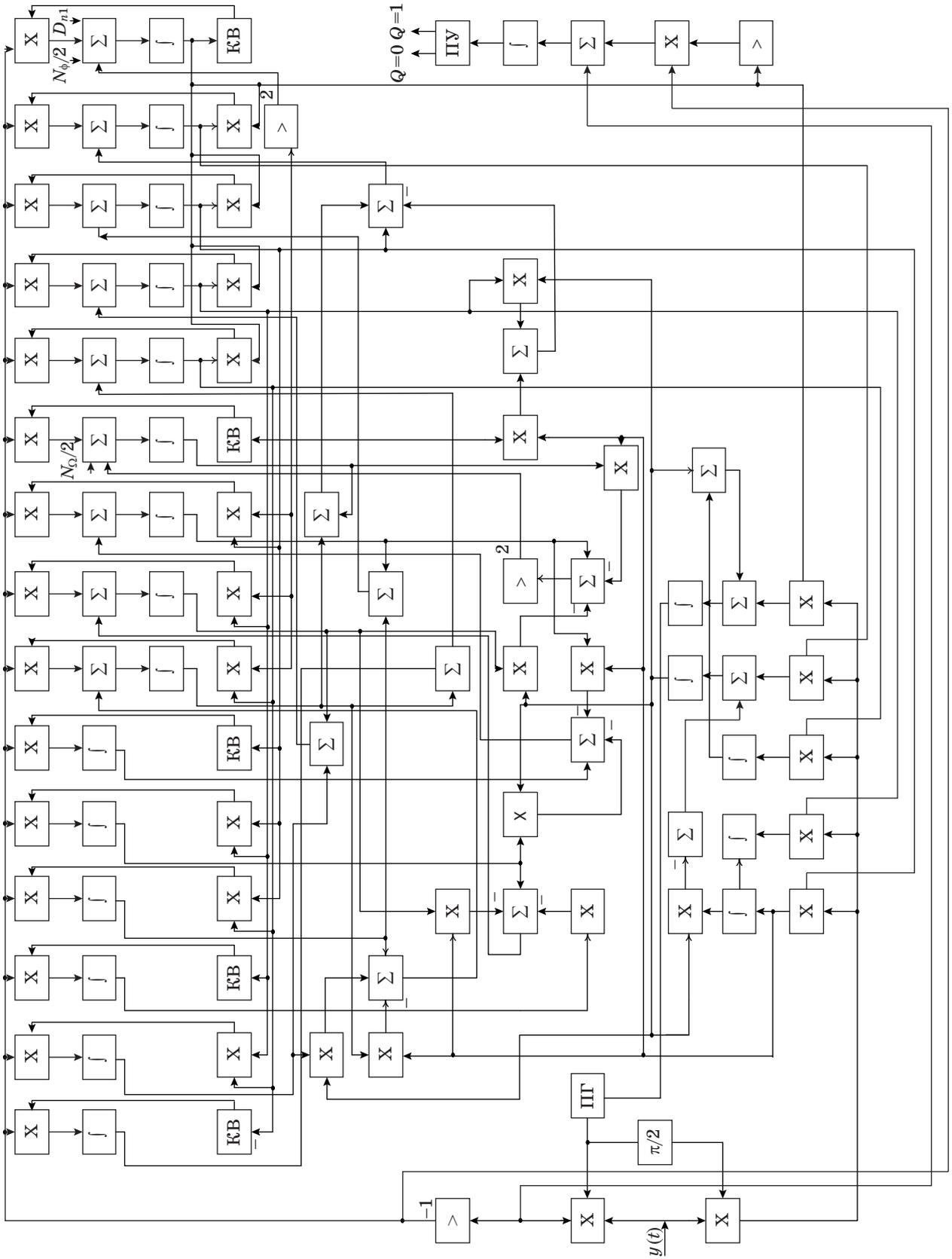
$$\dot{K}_{\Delta\gamma n_1} = -\frac{A_0}{N} y(t) K_{\Delta\gamma\phi} K_{n_1\phi} \sin[m_\phi(t)];$$

$$\dot{K}_{n_1 n_1} = -\frac{A_0}{N} y(t) K_{n_1\phi}^2 \sin[m_\phi(t)]; \quad (10)$$

$$\dot{z} = -\frac{A_0}{N} y(t) \sin[m_\phi(t)] - \frac{A_0}{N} y(t) \frac{K_{\phi\phi}}{2} \sin[m_\phi(t)]. \quad (11)$$

При выводе уравнений (9), (10) были опущены вибрационные члены с удвоенной частотой, дающие малый вклад в результате сглаживания в устройстве. Также в уравнении для логарифма отношения правдоподобия (11) отброшена константа $\frac{A_0^2}{4N}$, получающаяся от члена $\frac{A_0^2}{2N} \sin^2[m_\phi(t)]$ (ее можно включить в значение порога обнаружения).

Полученные уравнения определяют структурную схему оптимальной в гауссовом приближе-



■ Структура оптимального оценочно-корреляционного приемного устройства: *KB* — квадрат; *ПГ* — пороговое устройство; *ПУ* — переформируемый гетеродин; *ПУ* — пороговое устройство

нии системы совместного обнаружения и оценивания сигнала вида (1), которая является оптимальной при обработке сигнала как в переходном, так и установившемся режимах работы. Структурная схема устройства, моделирующая (9)–(11), представлена на рисунке. Блок нелинейной фильтрации, описываемый уравнениями (9), (10), моделируется следящим устройством типа фазовой автоподстройки частоты с переменными коэффициентами усиления в цепях обратной связи. Блок обнаружения описывается выражением (11). Устройство относится к классу оценочно-корреляционных приемных устройств [8] и осуществляет оценку неизвестных параметров сигнала, его корреляционную обработку и обнаружение.

Заключение

Следует отметить, что оптимизация приема сигналов в условиях априорной неопределенности приводит к сложным алгоритмам (9)–(11) и необходимости моделировать большое число уравнений. Поэтому в ряде случаев, при наличии некоторых априорных сведений о неизвестных параметрах сигнала, предпочтительным является использование квазиоптимальных в гауссовом приближении алгоритмов обнаружения — измерения [7]. Возможность перехода к квазиоптимальным алгоритмам рассматривается с позиций допустимого снижения качества получаемых оценок и решается исходя из конкретных условий, в которых осуществляется прием сигналов.

Литература

1. Справочник по радиолокации / под ред. М. И. Скольника; пер. с англ. под общ. ред. В. С. Вербы. В 2 кн. — М.: Техносфера, 2014. Кн. 2. — 680 с.
2. Willis N. J. *Bistatic Radar*. — SciTech Publishing, 2005. — 337 p.
3. Мельников Ю. П., Попов С. В. Радиотехническая разведка. Методы оценки эффективности местопределения источников излучения. — М.: Радиотехника, 2008. — 432 с.
4. Пархоменко Н. Г., Перетяцько А. А., Чернятьев Ю. Н., Шевченко В. Н. Современное состояние методов скрытой радиолокации подвижных объектов // Радиоконтроль: науч.-техн. сб. ОАО «КБ «Связь». Ростов н/Д, 2013. Вып. 16. С. 21–42.
5. Ульянов Г. Н., Лаврентьев Е. А., Павлов И. Н. Эллипсо-гиперболический метод построения многопозиционных систем // Информационно-управляющие системы. 2011. № 3(52). С. 30–34.

6. Репин В. Г., Тартаковский Г. П. Статистический синтез при априорной неопределенности и адаптация информационных систем. — М.: Сов. радио, 1977. — 432 с.
7. Сосулин Ю. Г. Теория обнаружения и оценивания стохастических сигналов. — М.: Сов. радио, 1978. — 320 с.
8. Сосулин Ю. Г., Костров В. В., Паршин Ю. Н. Оценочно-корреляционная обработка сигналов и компенсация помех. — М.: Радиотехника, 2014. — 632 с.
9. История отечественной радиолокации/ под ред. А. С. Якунина, Ю. А. Кузнецова, А. А. Рахманова. — М.: Столичная энциклопедия, 2011. — 768 с.
10. Кочемасов В. Н., Белов Л. А., Оконешников В. С. Формирование сигналов с линейной частотной модуляцией. — М.: Радио и связь, 1983. — 191 с.

UDC 621.396.96

doi:10.15217/issn1684-8853.2015.3.46

Adaptive Reception of FM Signals with Unknown Modulation Pattern

Tsybulnik A. N.^a, PhD, Tech., Professor, CAN1956@mail.ru

Leshko N. A.^b, PhD, Tech., Associate Professor, Nikolai_ZRU@mail.ru

^aYaroslavl branch of A. F. Mozhaiskii Military Space Academy, 28, Moskovskii Pr., 150001, Yaroslavl, Russian Federation

^bA. F. Mozhaiskii Military Space Academy, 13, Zhdanovskaia St., 197198, Saint-Petersburg, Russian Federation

Purpose: Aerial object detection with a beam subsource assumes coordinated reception of signals with a priori unknown parameters. Methods of receiving such signals lead to adaptive algorithms. The goal of the research is obtaining algorithms for joint detection and estimation of unknown parameters of a signal which is an additive mixture of an FM signal with an unknown carrying frequency, varying modulation pattern, random changes in phase and frequency, and white noise. **Results:** Using the equations of non-linear detection and estimation for the proposed signal model, working algorithms have been obtained along with the respective structure of an estimative-correlative receiver which contains a non-linear filtration block and a detection block. As the unknown parameter estimations become more accurate, the adjustable heterodyne is tuned to fit the signal contained in the input oscillation.

Keywords — A priori Uncertainty, Adaptation, FM Signal, Detection and Estimation Algorithms.

References

1. *Spravochnik po radiolokatsii* [Directory on a Radar-Location]. Ed. by M. I. Skolnik. The lane with eng. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2014. Vol. 2. 680 p. (In Russian).
2. Willis N. J. *Bistatic Radar*. SciTech Publishing, 2005. 337 p.
3. Melnikov J. P., Popov S. V. *Radiotekhnicheskaja razvedka. Metody otsenki effektivnosti mestoopredeleniia istochnikov izlucheniia* [Radio Engineering is Millers' Investigation. Methods of an Estimation Efficiency of a Fixing Source of Radiation]. Moscow, Politehnika Publ., 2008. 432 p. (In Russian).
4. Parkhomenko N. G., Peretyatko A. A., Chernyatiev Y. N., Shevchenko V. N. The Current State of Methods of Covert Radar Moving Objects. *Radiokontrol'*, Rostov-on-Don, OAO «KB «Sviaz'» Publ., 2013, iss. 16, pp. 21–42 (In Russian).
5. Ulyanov G. N., Lavrentyev E. A., Pavlov I. N. Elliptical-Hyperbolic Method for Constructing Multi-Positioning Systems *Informatsionno-upravliayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2011, no. 3(52), pp. 30–34 (In Russian).
6. Repin V. G., Tartakovskii G. P. *Statisticheskii sintez pri apriornoj neopredelennosti i adaptatsiia informatsionnykh system* [Statistical Synthesis at the Prior Indeterminacy and Adaptation of Intelligence Systems]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1977. 432 p. (In Russian).
7. Sosulin I. G. *Teoria obnaruzheniia i otsenivaniia stokhasticheskikh signaiov* [Theory of Detection and Estimation of Stochastic Signals]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1978. 320 p. (In Russian).
8. Sosulin I. G., Kostrov V. V., Parshin I. N. *Otsenochno-korreliatsionnaja obrabotka signalov i kompensatsiia pomekh* [It is Estimating and Correlative Processing of Signals and Compensation of Hindrances]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2014. 632 p. (In Russian).
9. *Istoriia oteshestvennoi radiolokatsii* [History of a Domestic Radar-Location]. A. S. Iakunin, I. A. Kuznetsov, A. A. Rakhmanov eds. Moscow, Stolichnaia entsiklopediia Publ., 2011. 320 p. (In Russian).
10. Kochemasov V. N., Belov L. A., Okoneshnikov V. S. *Formirovanie signalov s lineinoi chastotnoi moduliatsiei* [Formation of Signals with the Linear frequency modulation]. Moscow, Radio i sviaz' Publ., 1983. 191 p. (In Russian).

Научный журнал
«ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ»
 выходит каждые два месяца.

Стоимость годовой подписки (6 номеров) для подписчиков России — 4800 рублей, для подписчиков стран СНГ — 5400 рублей, включая НДС 18%, таможенные и почтовые расходы.

Подписку на печатную версию журнала можно оформить в любом отделении связи по каталогу:

«Роспечать»: № 48060 — годовой индекс, № 15385 — полугодовой индекс,

а также через посредство подписных агентств:

«Северо-Западное агентство „Прессинформ“»

Санкт-Петербург, тел.: (812) 335-97-51, 337-23-05,

эл. почта: press@crp.spb.ru, zajavka@crp.spb.ru,

сайт: <http://www.pinform.spb.ru>

«МК-Периодика» (РФ + 90 стран)

Москва, тел.: (495) 681-91-37, 681-87-47,

эл. почта: export@periodicals.ru, сайт: <http://www.periodicals.ru>

«Информнаука» (РФ + ближнее и дальнее зарубежье)

Москва, тел.: (495) 787-38-73, эл. почта: informnauka3@yandex.ru,

сайт: <http://www.informnauka.com>

«Деловая пресса»

Москва, тел.: (495) 962-11-11, эл. почта: podpiska@delpress.ru,

сайт: <http://delpress.ru/contacts.html>

«Коммерсант-Курьер»

Казань, тел.: (843) 291-09-99, 291-09-47, эл. почта: kazan@komcur.ru,

сайт: <http://www.komcur.ru/contacts/kazan/>

«Урал-Пресс» (филиалы в 40 городах РФ)

Сайт: <http://www.ural-press.ru>

«Идея» (Украина)

Сайт: <http://idea.com.ua>

«BTL» (Узбекистан)

Сайт: <http://btl.sk.uz/ru/cat17.html> и др.

На электронную версию нашего журнала (все выпуски, годовая подписка, один выпуск, одна статья)

вы можете подписаться на сайтах НЭБ: <http://elibrary.ru>;

РУКОНТ: <http://www.rucont.ru>; ИВИС: <http://www.ivis.ru>/

Полнотекстовые версии журнала за 2002–2014 гг.

в свободном доступе на сайте журнала (<http://www.i-us.ru>),

НЭБ (<http://www.elibrary.ru>)

и Киберленинки (<http://cyberleninka.ru/journal/n/informatsionno-upravlyayushchiesistemy>).

Печатную версию архивных выпусков журнала за 2003–2014 гг. вы можете заказать в редакции по льготной цене.

ПРОГРАММА СИНТЕЗА И АНАЛИЗА ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ FILM MANAGER

Е. Н. Котликов^а, доктор физ.-мат. наук, профессор

Ю. А. Новикова^а, ассистент

И. И. Коваленко^а, канд. физ.-мат. наук, доцент

^аСанкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, РФ

Постановка проблемы: задача синтеза интерференционных покрытий является необходимой и составной частью процесса разработки всех оптических элементов приборов оптоэлектроники. Ее решение сопряжено со значительными трудностями, характерными для обратных задач, так как отсутствуют строго определенные методы. Целью исследования является создание современного программного обеспечения, позволяющего комплексно решать эту проблему, проектировать интерференционные покрытия с требуемыми свойствами. **Результаты:** разработано программное обеспечение Film Manager для синтеза и анализа устойчивости интерференционных оптических покрытий различного назначения. Проектировщик может определить начальную структуру, методы оптимизации, пригодность синтезируемого покрытия, пленкообразующие материалы из имеющейся базы данных. Проверка качества программного обеспечения проведена на примере синтеза ахроматических просветляющих покрытий в средней инфракрасной области спектра на подложках из кремния. Выигрыш по оценке функции качества и критерия устойчивости показал снижение остаточного отражения в полтора-два раза по сравнению с известными решениями. **Практическая значимость:** применение программного обеспечения Film Manager показало возможность реализации ахроматических просветляющих покрытий в средней инфракрасной области спектра на любых подложках. Разработанные покрытия позволяют снизить остаточное отражение и обладают высокими оптическими и эксплуатационными свойствами.

Ключевые слова — интерференционные покрытия, спектры, критерий устойчивости, функция качества, эквивалентные слои, пленки.

Введение

С широким применением тонких пленок в производстве задачи проектирования оптических покрытий стали очень актуальными, но они практически не поддаются аналитическому решению, поэтому важным является изучение эффективных численных методов, а также приобретение навыков создания программного обеспечения. Математическое описание синтеза многослойных оптических покрытий является нетривиальной проблемой в силу того, что сложны сами математические модели рассеяния электромагнитного излучения на дифракционных оптических системах. Поэтому в большинстве случаев используется следующий подход. Выполняется итеративный поиск оптимальной конструкции, на каждом шаге которого решается прямая задача дифракции света на многослойной системе. Переход от шага к шагу осуществляется методом улучшения целевой функции, характеризующей отклонения рассчитанных характеристик текущей системы от технического задания, т. е. решается задача оптимизации. Каждая задача оптимизации начинается с задания начальной конфигурации системы, поэтапного сравнения характеристик нового варианта с предыдущим и прекращения процесса оптимизации в зависимости от значения функции качества [1].

В настоящей работе описан метод проектирования ахроматических просветляющих покрытий с использованием программы анализа и синтеза интерференционных покрытий (ИП) Film Manager.

Структура программы

Программное обеспечение написано на языке Object Pascal в среде Delphi [2] и функционирует под управлением операционных систем Windows всех поколений. В основе описываемой программы лежит программа FilmMgr [3, 4], которая была модернизирована за счет включения ряда дополнительных опций и получила название Film Manager. Добавлены следующие опции: замена пленки с произвольным показателем преломления на эквивалентную трехслойную структуру типа HLH или LHL, замена трехслойной структуры типа HLH или LHL на реальные пленки из базы данных, возможность анализа и синтеза от подложки конечной толщины наряду с полубесконечной поглощающей или непоглощающей подложкой.

В программе Film Manager есть возможность использовать базы данных пленкообразующих материалов, где учтены дисперсии показателей преломления и поглощения во всем рассматриваемом диапазоне спектра. Задаваемыми параметрами являются спектральный интервал, число

слоев, значения показателей преломления и оптических толщин слоев, диапазон перебора значений показателей преломления и оптических толщин слоев, величина шага поиска. Расчет спектров ведется как для нормального, так и для наклонного падения излучения, причем в случае наклонного падения излучение может быть любой поляризации.

В программе используется поэтапное (или выборочное) выполнение двух поисковых алгоритмов:

— случайного перебора с переменным шагом поиска [5, 6], когда генерируются случайные значения показателя преломления и толщины каждого слоя и вычисляется отклонение от эталонного спектра. В случае минимального отклонения значения показателей преломления и толщины сохраняются. В качестве отклонения используется сумма модулей относительных отклонений значений отражения или пропускания от заданных в каждой точке спектра;

— квадратичной аппроксимации Пауэлла [6], при использовании которой начальным приближением может служить найденная первым методом структура. В общем случае данный метод применяется для уточнения полученного результата и для уменьшения времени поиска окончательной структуры покрытия.

На последнем этапе синтеза возможна замена отдельных слоев с показателями преломления, для которых не найдены пленкообразующие материалы, на эквивалентные трехслойные симметричные системы, состоящие из реальных веществ. После замены проводится поиск решения по минимуму функции качества.

На заключительном этапе конструирования покрытий с заданными характеристиками предусмотрен анализ устойчивости полученных решений к вариациям параметров слоев. С помощью программы можно смоделировать действие различных дестабилизирующих факторов, имеющих место при изготовлении покрытий.

Задача синтеза сводится к решению задачи по минимизации функции качества в заданной области D^{2m} -мерного пространства E^m , где m — число слоев интерференционного покрытия [5].

В программе функция качества имеет следующий вид:

$$F = \sum_{i=1}^N |R_p(\lambda_i) - R_o(\lambda_i)| \cdot W(\lambda_i), \quad (1)$$

где $R_p(\lambda_i)$ и $R_o(\lambda_i)$ — расчетное и эталонное (требуемое) значение коэффициента отражения на длине волны $\lambda_i = \lambda_{\min} + (i - 1)\Delta\lambda$, λ_{\min} — коротковолновая граница спектрального интервала, $\Delta\lambda$ — величина шага поиска; N — число точек, в которых вычисляется спектр; $W(\lambda_i)$ — весовой множитель в точке i , задаваемый пользователем.

В формуле (1) модули относительных отклонений значений отражения или пропускания от заданных в каждой точке спектра умножаются на весовые множители, задаваемые пользователем, что дает возможность визуально корректировать расчетную спектральную кривую, максимально приближая ее к эталонной на наиболее важных участках спектра непосредственно в процессе синтеза. Спектры пропускания, отражения и поглощения рассчитываются матричным методом [7] и отображаются на экране на любом этапе синтеза.

Используемый в процессе синтеза покрытия метод случайного поиска, совмещенный с задаваемым непосредственно пользователем шагом поиска и визуальной коррекцией синтезируемых спектров, позволяет с большей вероятностью, по сравнению с другими методами, получить необходимое устойчивое решение [8].

Основываясь на физических свойствах задачи, практический интерес мы видим в поиске решений, имеющих малую чувствительность к вариациям параметров слоев. Поэтому после поиска минимума функции качества методом случайного перебора в программу заложена возможность дополнительной оптимизации структуры покрытия.

После оптимизации есть возможность варьировать параметры. Если не добились требуемого результата (покрытия), применяется метод квадратичной аппроксимации Пауэлла. Он относится к группе методов решения экстремальной задачи нулевого порядка, в которой, как и в первом случае, используются только значения минимизируемой функции, а не ее производные, — методам прямого поиска. Для нашей программы была взята уже составленная [9] на языке Turbo Pascal программа квадратичной аппроксимации Пауэлла, но измененная на Object Pascal. Эти изменения носили принципиальный характер, например, был заменен оператор вывода на печать.

Основные элементы управления программы (рис. 1):

— Data input — ввод параметров среды, подложки, слоев, угловых характеристик излучения и т. д., а также запуск процесса оптимизации покрытия;

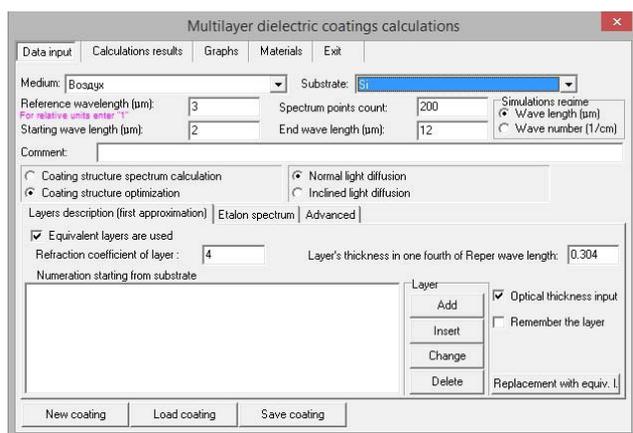
— Calculations results — отображение спектральных значений пропускания, отражения и поглощения, а также структура оптимизированного покрытия;

— Graphs — графическое изображение спектров;

— Materials — редактор базы данных используемых материалов;

— Replacement with equiv. layers — замена однослойных пленок на трехслойные эквивалентные комбинации;

— Exit — окончание работы с программой.



■ Рис. 1. Интерфейс программы

Пример синтеза ахроматического просветляющего покрытия приведен ниже.

Алгоритм программы

Рассмотрим алгоритм программы синтеза ИП Film Manager, блок-схема которого представлена на рис. 2.

В начале процесса синтеза ИП задается информация о пленкообразующих материалах, которые предполагается использовать в покрытии. Информация может быть введена двумя способами. В одном случае вводится число слоев и некоторый набор пленок с произвольными толщинами и показателями преломления (в пределах допустимого от 1,3 до 5,2). Во втором случае — набор пленок с некоторыми толщинами (h) и показателями преломления (n). Далее задается рабочий спектральный диапазон (в длинах волн или волновых числах), материалы подложек и окружающей среды, уточняется начальное приближение структуры покрытия (n , h и число слоев) исходя из общих требований для заданного типа покрытия, данные об эталонном (требуемом) спектре покрытия и т. д.

После этого осуществляется выбор режима оптимизации по методу случайного поиска (или методу Пауэлла). При этом запускается процесс генерации по случайному закону векторов n и h слоев в заданном диапазоне значений и вычисляются спектры отражения и пропускания первичной структуры покрытия путем определения значений соответствующих функций качества, которые сохраняются.

Если новое вычисленное значение функции качества меньше предыдущего, то соответствующие векторы n и h сохраняются как оптимальные на данном этапе синтеза. Текущие значения функции качества выводятся на экран дисплея для того, чтобы пользователь мог визуально контролировать процесс оптимизации.

Если принимается удовлетворительное решение, то строятся графики спектров и вновь визуально и аналитически (теперь по графикам) определяется близость полученного вывода к требуемому решению. При неудовлетворительном решении проводится корректировка весовых множителей в заданном спектре для устранения нежелательных экстремумов в расчетном спектре и вновь запускается процесс генерации по случайному закону n и h слоев и вычисляются значения функции качества для спектральных коэффициентов отражения и пропускания.

В случае если вычисленное значение на этот раз больше предыдущего сохраненного значения и время, отведенное на процесс, еще не истекло, то вновь запускается процесс генерации по случайному закону векторов n и h слоев. Если же время истекло, то строятся графики, и вновь пользователь принимает решение об удовлетворительном или неудовлетворительном виде спектра по степени близости к заданному, исходя из конкретных условий физической задачи.

При удовлетворительном виде рассчитанного спектра соответствующая структура берется как начальное приближение при дальнейшей оптимизации методом Пауэлла.

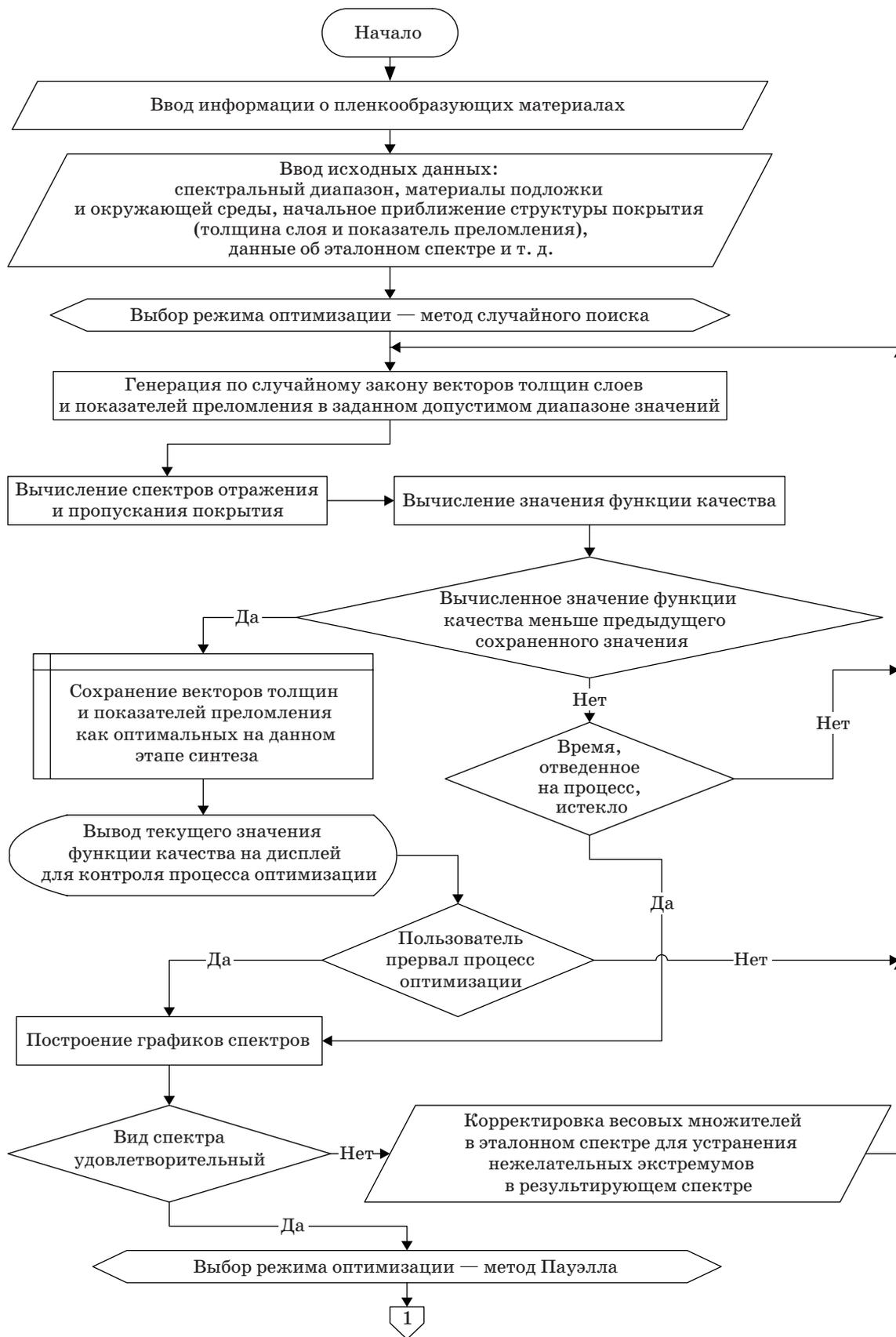
Запускается процесс итерации для нахождения минимума функции качества при варьировании значений n и h слоев. Полученные векторы n и h сохраняются как оптимальные на данном этапе синтеза, и текущее значение функции качества выводится на экран для визуального и аналитического контроля. Если пользователь не прерывает процесс оптимизации, то процесс нахождения минимума функции качества продолжается.

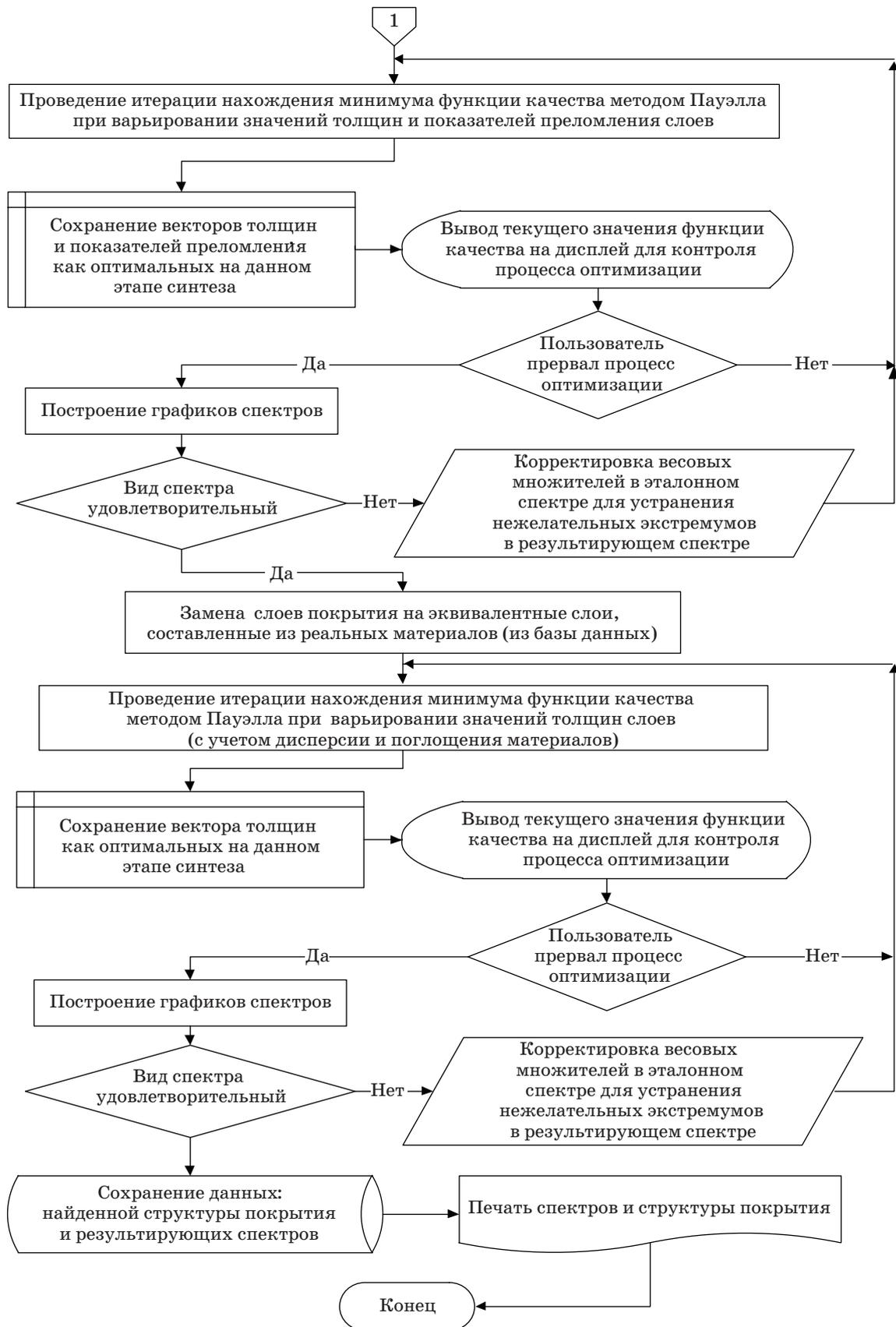
При положительном решении о достижении требуемого спектра с заданной степенью приближения пользователь может прервать процесс оптимизации. В этом случае проводится построение графиков и оценивается их вид.

Если решение не устраивает, то осуществляется корректировка весовых множителей в эталонном спектре для устранения нежелательных экстремумов в рассчитанном спектре и вновь запускается итерационный процесс.

Если вид спектра удовлетворительный, то проводится теоретическая замена слоев покрытия на близкие по значениям показателей преломления пленок слои из реальных веществ. Слои, для которых не нашлось в базе данных подходящих веществ, заменяются эквивалентными трехслойными структурами из реальных веществ.

Вновь проводится итерационный процесс нахождения функции качества методом Пауэлла, но теперь только при варьировании толщины h слоев (с учетом дисперсии оптических констант материалов слоев). Значение векторов h на данном этапе синтеза, текущее значение функции





■ Рис. 2. Блок-схема алгоритма для синтеза ИП

качества выводятся на экран для контроля процесса. Если пользователь прерывает процесс оптимизации, то строятся графики и оценивается их вид.

При удовлетворительном виде графиков данные найденной структуры ИП и соответствующих спектров сохраняются и выводятся на печать как искомое решение задачи. При удовлетворительном виде рассчитанного спектра соответствующая структура берется как начальное приближение при дальнейшей оптимизации методом Пауэлла.

Запускается процесс итерации для нахождения минимума функции качества при варьировании значений n и h слоев. Полученные векторы n и h сохраняются как оптимальные на данном этапе синтеза, и текущее значение функции качества выводится на экран для визуального и аналитического контроля. Если пользователь не прерывает процесс оптимизации, то процесс нахождения минимума функции качества продолжается.

Пример синтеза просветляющего покрытия на кремнии

Задача синтеза, сформулированная в виде оптимизационной задачи, предусматривает выбор численного метода согласно определенному критерию выбора «лучшего» метода. В общем случае основными оценками работы алгоритма являются его надежность и быстродействие. При этом на значения показателей преломления и толщин слоев накладывается ряд ограничений, связанных с технологиями изготовления покрытий.

С точки зрения практической реализации интерес представляет поиск не глобального минимума, а решений, имеющих малую чувствительность к вариациям параметров слоев. Выбранные нами поисковые алгоритмы при использовании их в комбинации позволяют на практике получить необходимое устойчивое решение.

В качестве примера рассмотрим процесс просветляющего покрытия (ПП) на кремнии в диапазоне от 2 до 12 мкм. Как уже упоминалось выше, для того чтобы не попасть в локальный экстремум, осуществляя оптимизацию оптического покрытия, необходимо при поиске минимума функции качества использовать два алгоритма: случайный перебор с переменным шагом поиска и квадратичную аппроксимацию Пауэлла. Поэтапный процесс синтеза включает выбор начального приближения, оптимизацию по показателям преломления и толщинам слоев, замену слоев эквивалентными комбинациями и оптимизацию ПП по толщинам слоев, а также расчет функции качества с помощью программы Film Manager. В качестве подложки мы использовали кремний марки КЭФ-4.5, показатель преломления которого $n_s = 3,42$. Далее синтезировали рав-

нотолщинные покрытия. Пленкообразующими материалами служили германий, сульфид цинка и фторид бария. Роль обрамляющей среды играл воздух с $n_0 = 1$.

Синтез ПП проводится в несколько этапов. На первом этапе задается начальное приближение. Для подложек с высоким коэффициентом преломления в его основе лежит структура из пленок с последовательно уменьшающимися от подложки коэффициентами преломления. Число пленок и их толщины задаются требуемым спектральным диапазоном просветления $\lambda_{\max} - \lambda_{\min}$ и средним значением коэффициента отражения в указанной области спектра.

В работе [4] предложено использовать для получения ПП следующие эмпирические выражения. Число пленок N в первом приближении можно определить как

$$N = \frac{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}}{\lambda_{\min}}. \quad (2)$$

В зависимости от требований к остаточному коэффициенту отражения число пленок N может быть увеличено (от одной до трех). С увеличением числа слоев среднее отражение уменьшается, также уменьшается отражение в пиках.

Средняя толщина этих пленок d_{cp} в первом приближении определяется из уравнения

$$\frac{1}{d_{\text{cp}}} = 2 \left(\frac{1}{\lambda_{\max}} + \frac{1}{\lambda_{\min}} \right). \quad (3)$$

Наконец, коэффициент преломления n_i слоя i (нумерация от подложки) можно задать как

$$n_i = n_s - i \left(\frac{n_s - n_{\min}}{N} \right). \quad (4)$$

Уравнения (2)–(4) позволяют задать начальное приближение при синтезе просветляющего покрытия на подложке с высоким коэффициентом преломления.

Оптические толщины слоев покрытий равны $\lambda_0/4$. Для получения удовлетворительного ПП можно взять за основу последний слой пленки с минимальным коэффициентом отражения, в нашем случае использовалась пленка фторида бария (BaF_2). В соответствии с этим в качестве начального приближения берем структуру, представленную в табл. 1 на первых этапах синтеза, полученную с использованием формул (2), (3). При синтезе покрытия последовательно использовались метод случайного перебора и метод Пауэлла. Опорная длина волны λ_0 при расчете на нашей программе составляла 3 мкм.

Задача синтеза неоднозначна, поэтому можно получить ряд покрытий, которые нуждаются в проверке на устойчивость. Для получения численного значения критерия устойчивости можно использовать методику, описанную в работах [10, 11].

Спектры синтезированных покрытий представлены на рис. 3.

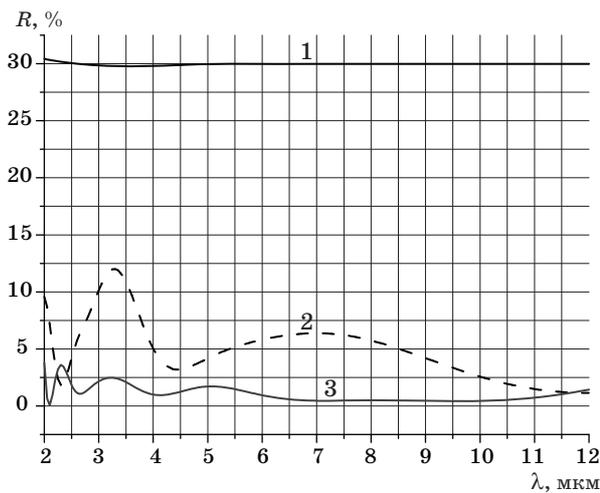
Результаты расчетов конструкции ПП с использованием метода эквивалентных слоев приведены в табл. 2. Рассчитанные на разных этапах функции качества характеризуют отклонения от заданного спектра.

Спектральные характеристики начального приближения и реальной структуры (оптимизированной эквивалентной структуры) представлены на рис. 4.

В качестве исходного использовалось оптимизированное начальное приближение с помощью метода Пауэлла (см. рис. 4, кривая 2). На следующем этапе синтеза проводилась замена слоев

■ Таблица 1. Структуры ПП на подложках из кремния на первых этапах синтеза

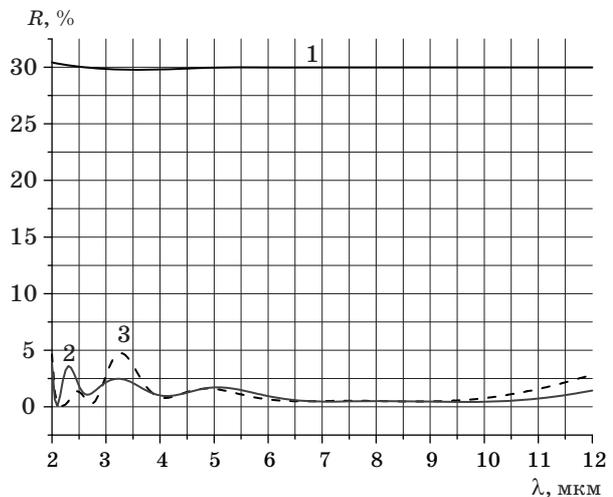
№ слоя	Начальное приближение		Оптимизация начального приближения			
			Случайный метод		Метод Пауэлла	
	<i>n</i>	<i>d, λ/4</i>	<i>n</i>	<i>d, λ/4</i>	<i>n</i>	<i>d, λ/4</i>
1	3,2	1	3,137	0,854	3,256	1,162
2	3,0	1	2,995	1,067	2,927	1,265
3	2,8	1	2,562	0,921	2,747	0,275
4	2,4	1	1,882	0,889	2,449	1,057
5	2,0	1	2,197	1,046	1,978	1,125
6	1,6	1	1,673	0,925	1,578	1,062
7	1,35	1	1,350	1,087	1,350	1,281
<i>F</i>	1,366		1,143		0,700	



■ Рис. 3. Спектры синтезированных покрытий на подложках из кремния на первых этапах синтеза: 1 — спектр отражения одной стороны подложки из кремния; 2 — спектр второго приближения по методу случайного поиска; 3 — спектр второго приближения после оптимизации по методу Пауэлла

■ Таблица 2. Конструкция ПП на основе пленок Ge, ZnS, PbF₂, BaF₂

№ слоя	Метод Пауэлла		Эквивалентные слои		Оптимизированное эквивалентное покрытие	
	<i>n</i>	<i>d</i>	<i>n</i>	<i>d</i>	<i>n</i>	<i>d</i>
1	3,256	1,162	4	0,304	Ge	0,304
			2,15	0,212	ZnS	0,212
			4	0,304	Ge	0,421
2	2,927	1,265	4	0,117	ZnS	0,203
			2,15	0,203		
			4	0,117	Ge	0,319
3	2,747	0,275	4	0,202	ZnS	0,292
			2,15	0,292		
			4	0,202	Ge	0,436
4	2,449	1,057	4	0,234	ZnS	0,555
			2,15	0,555		
			4	0,244	Ge	0,244
5	1,978	1,125	2,15	1,449	ZnS	1,449
6	1,578	1,062	1,6	1,192	PbF ₂	1,192
7	1,350	1,281	1,35	1,129	BaF ₂	1,129
<i>F</i>	0,948		2,217		2,333	



■ Рис. 4. Спектры покрытия на последних этапах расчета: 1 — спектр отражения одной стороны подложки из кремния; 2 — спектр второго приближения после оптимизации по методу Пауэлла; 3 — спектр оптимизированного эквивалентного покрытия на основе пленок Ge, ZnS, PbF₂, BaF₂

с произвольными показателями преломления на эквивалентные структуры. В качестве эквивалентной нами была использована структура НЛН (высокий-низкий-высокий) для 7-слойной структуры.

Затем проводилась замена на пленки из базы данных с учетом дисперсии показателей прелом-

ления и поглощения. В случае, когда требуемые коэффициенты преломления близки к коэффициентам преломления пленок, проводилась замена на одиночные пленки.

В итоге 7-слойное покрытие стало 12-слойным. На последнем этапе проводилась оптимизация покрытия с реальными значениями дисперсионных констант пленок. На каждом этапе проводился расчет функции качества по формуле (1).

Из полученных результатов видно, что спектральные характеристики начальной структуры почти совпадают со структурой, в которой несуществующие в природе показатели преломления заменяются на эквивалентные слои реально существующих материалов (см. рис. 4, кривая 3).

На последнем этапе проводился анализ устойчивости полученной структуры. Для этого варьировались в небольших пределах толщины отдельных слоев или группы слоев и для них находились изменения функции качества. Как уже говорилось выше, для более детального анализа устойчивости использовалась другая програм-

ма [10], в которой предусмотрен анализ устойчивости для отдельных слоев и всего покрытия в целом.

Заключение

В работе описана программа анализа и синтеза интерференционных покрытий Film Manager. В программе реализуется возможность синтеза интерференционных покрытий путем минимизации функции качества методами случайного перебора с переменным шагом поиска и квадратичной аппроксимации Пауэлла, а также нахождения оптимальной структуры покрытия на основе метода эквивалентных слоев. В качестве примера приведен синтез просветляющего покрытия на подложке из кремния. Синтез реализован с использованием известной базы данных по дисперсионным характеристикам пленкообразующих материалов.

Работа выполнена при финансовой поддержке МОиН РФ в рамках государственного задания.

Литература

1. Ловецкий К. П., Севастьянов Л. А., Паукшто М. В., Бикеев О. Н. Математический синтез оптических наноструктур. — М.: РУДН, 2008. — 123 с.
2. Федоров А. Г. Создание Windows-приложений в среде Delphi. — М.: Компьютер Пресс, 1995. — 287 с.
3. Свидетельство о гос. регистрации № 2011612364 от 22.03.2011. Программа синтеза интерференционных покрытий «FilmMgr» / Е. Н. Котликов, Е. В. Хонинева. (РФ). — СПб.: ГУАП, 2011.
4. Котликов Е. Н., Варфоломеев Г. А., Лавровская Н. П., Тропин А. Н., Хонинева Е. В. Проектирование, изготовление и исследование интерференционных покрытий. — СПб.: ГУАП, 2009. — 188 с.
5. Яковлев П. П., Мешков Б. Б. Проектирование интерференционных покрытий. — М.: Машиностроение, 1987. — 192 с.
6. Васильев Ф. П. Численные методы решения экстремальных задач. — М.: Наука, 1980. — 520 с.

7. Born M., Wolf E. Principles of Optics. — London: Pergamon, 1959. — 856 p.
8. Dobrovolski J. A., Piotrovski S. H. C. Refractive Index as Variable in the Numerical Design of Optical thin Film Systems//Applied Optics. 1982. Vol. 21. P. 1502–1511.
9. Press W. H., Flannery B. P., Teukolsky S. A., Vetterling W. T. Numerical Recipes. The Art of Scientific Computing. — Cambridge University Press, 1988. — P. 294–301.
10. Котликов Е. Н., Новикова Ю. А. Программное обеспечение для анализа устойчивости и коррекции интерференционных покрытий // Информационно-управляющие системы. 2013. № 1. С. 41–46.
11. Котликов Е. Н., Новикова Ю. А. Сравнительный анализ критериев устойчивости интерференционных покрытий // Оптический журнал. 2013. Т. 80. № 9. С. 61–67.

UDC 05.11.14:05.13.19

doi:10.15217/issn1684-8853.2015.3.51

Film Manager Software for Synthesis and Analysis of Interference Coatings

Kotlikov E. N.^a, Dr. Sc., Phys.-Math., Professor, ekotlikov45@mail.ru

Novikova Yu. A.^a, Assistant Professor, nov-jliana@yandex.ru

Kovalenko I. I.^a, PhD, Phys.-Math., Associate Professor, docent_95@inbox.ru

^aSaint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaya St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation

Purpose: The problem of interference coating synthesis is a necessary component in designing any optical engineering element. Its solution involves considerable difficulties common for inverse problems, as there are no well-defined methods. The aim of this study

is creating modern software capable to design interference coatings with predefined characteristics. **Results:** Software called Film Manager has been developed for the synthesis and stability analysis of interference optical coatings of various types. The designer can specify the initial structure, optimization techniques, suitability of the synthesized coating, and film-forming materials from the available database. The software has been verified on the example of synthesizing achromatic antireflection coatings in the mid-infrared region of the spectrum on silicon substrates. The gain in the estimated quality function and stability criterion has demonstrated that the residual reflection is 1.5–2 times lower compared to the known solutions. **Practical relevance:** Using Film Manager software has shown that achromatic antireflection coatings can be implemented in the mid-infrared region of the spectrum on any substrate. The developed coatings can reduce the residual reflection, having high optical and operational properties.

Keywords — Interference Coatings, Spectra, Stability Criterion, Quality Function, Equivalent Layers, Films.

References

1. Lovetskii K. P., Sevast'ianov L. A., Pauksho M. V., Biskeev O. N. *Matematicheskii sintez opticheskikh nanostruktur* [Mathematical Synthesis of Optical Nanostructures]. Moscow, Rossiiskii universitet druzhby narodov Publ., 2008. 123 p. (In Russian).
2. Fedorov A. G. *Sozdanie Windows-prilozhenii v srede Delphi* [Create Windows Applications in the Delphi Environment]. Moscow, Computer Press Publ., 1995. 287 p. (In Russian).
3. Kotlikov E. N., et al. *Programma sinteza interferentsionnykh pokrytii «FilmMgr»* [Program Synthesis Interference Coatings "FilmMgr"]. Certificate of state registration, no. 2011612364, 2011.
4. Kotlikov E. N., Varfolomeev G. A., Lavrovskaja N. P., Tropin A. N., Khonineva E. V. *Proektirovanie, izgotovlenie, i issledovanie interferentsionnykh pokrytii* [Design Fabrication and Following Interference Coatings]. Saint-Petersburg, GUAP Publ., 2009. 188 p. (In Russian).
5. Jakovlev P. P., Meshkov B. B. *Proektirovanie interferentsionnykh pokrytii* [Designing Interference Coatings]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1987. 192 p. (In Russian).
6. Vasiliev F. P. *Chislennye metody reshenii ekstremal'nykh zadach* [Numerical Methods for Solving Extremal Problems]. Moscow, Nauka Publ., 1980. 520 p. (In Russian).
7. Born M., Wolf E. *Principles of Optics*. London, Pergamon, 1959. 856 p.
8. Dobrovolski J. A., Piotrovski S. H. C. Refractive Index as Variable in the Numerical Design of Optical Thin Film Systems. *Applied Optics*, 1982, vol. 21, pp. 1502–1511.
9. Press W. H., Flannery B. P., Teukolsky S. A., Vetterling W. T. *Numerical Recipes. The Art of Scientific Computing*. Cambridge University Press, 1988, pp. 294–301.
10. Kotlikov E. N., Novikova Yu. A. Software for Stability Analysis and Correction of Interferential Coverings. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2013, no. 1(62), pp. 41–46 (In Russian).
11. Kotlikov E. N., Novikova Yu. A. Comparative Analysis of the Stability Criteria of Interference Coatings. *Opticheskii zhurnal*, 2013, no. 80, pp. 571–576 (In Russian).

МЕТОДИКА ВЫБОРА КОНТРМЕР В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ ИНФОРМАЦИЕЙ И СОБЫТИЯМИ БЕЗОПАСНОСТИ

И. В. Котенко^а, доктор техн. наук, профессор

Е. В. Дойникова^а, младший научный сотрудник

^аСанкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН, Санкт-Петербург, РФ

Цель: ручная обработка информации, связанной с безопасностью, может привести к упущению важных факторов и, в конечном итоге, к выбору неэффективных защитных мер. Целью исследования является автоматизация процесса выбора защитных мер путем обработки данных по безопасности. **Результаты:** разработана методика выбора контрмер в процессе управления информацией и событиями безопасности, основанная на предложенной авторами комплексной системе показателей защищенности, отражающих ситуацию по безопасности в сети. Для выбора контрмер в систему показателей вводится дополнительный уровень поддержки принятия решений, базирующийся на показателях оценки эффективности применения контрмер. Основными особенностями предлагаемого подхода являются использование графов атак и зависимостей сервисов, применение предлагаемых модели контрмер и показателей защищенности, а также возможность предоставления решения по выбору контрмер в любой момент времени в соответствии с текущей информацией о состоянии защищенности и событиях безопасности. **Практическая значимость:** разработанная методика позволит повысить эффективность процесса принятия решений по выбору защитных мер в системах управления информацией и событиями безопасности.

Ключевые слова — инциденты безопасности, мониторинг, реагирование, показатели защищенности, выработка контрмер, графы атак, графы зависимостей сервисов.

Введение

Современные информационные системы, как правило, содержат большое количество связанных между собой устройств и средств управления безопасностью, формирующих огромное количество информации и событий безопасности. Эту информацию необходимо обрабатывать в целях выявления возможных уязвимостей в защите, идентификации компьютерных атак и принятия контрмер.

Ручная обработка данной информации неэффективна по ряду причин: ограниченное время обработки, в результате чего время на противодействие компьютерной атаке может быть упущено; зависимость от уровня знаний эксперта, который может упустить важное сообщение или не связать между собой события, указывающие на атаку; возможность нанести системе еще больший ущерб в результате применения неэффективных контрмер или неправильной оценки уровня разрушительности атаки и несвоевременного реагирования на нее из-за сложных взаимосвязей между устройствами и сервисами системы.

Системы управления информацией и событиями безопасности (*Security Information and Events Management* — SIEM) создаются с целью решить эти проблемы и автоматизировать процесс обработки информации и событий безопасности [1, 2]. Функции SIEM-систем включают сбор записей о событиях из различных источников, их нормализацию, корреляцию, агрегацию, аналитическую обработку и составление отчетов.

Для повышения эффективности реагирования на компьютерные атаки в рамках исследований авторами в архитектуру SIEM-системы был добавлен компонент анализа защищенности на основе графов атак и зависимостей сервисов [1, 2]. Данный компонент дает возможность в результате анализа информации и событий безопасности сформировать ряд показателей защищенности, позволяющих сделать выводы об уровне защищенности системы и выбрать набор наиболее эффективных контрмер как для повышения общего уровня защищенности системы, так и для реагирования на отдельные атаки, выполняемые в реальном времени [3].

При разработке подхода, лежащего в основе работы компонента, учитывались особенности архитектуры SIEM-систем и особенности моделирования атак на компьютерные сети в виде графов атак [3].

Основными особенностями предлагаемого в статье подхода являются использование графов атак и зависимостей сервисов; применение введенной модели контрмер, базирующейся на стандартах «Общее перечисление защитных мер» (*Common Remediation Enumeration* — CRE) [4] и «Расширенная информация по защитным мерам» (*Extended Remediation Information* — ERI) [5]; использование предложенных показателей эффективности, стоимости и побочного ущерба контрмеры, а также возможность предоставления решения по выбору контрмер в любой момент времени в зависимости от текущей информации о состоянии защищенности и событиях безопасности в статическом и динамическом режимах

функционирования. Предлагаемый в работе подход позволит повысить защищенность информационных систем за счет автоматизации выбора обоснованных защитных мер.

Релевантные работы

Ранее авторы рассматривали вопросы вычисления различных показателей защищенности на основе графов атак и графов зависимостей сервисов [3]. В данной работе рассматриваются вопросы применения предложенных показателей, а также новых показателей уровня поддержки принятия решений для выбора контрмер. Подход учитывает и развивает модели и методы для расчета показателей, рассмотренные в работе [6].

При разработке подхода к выбору контрмер учитывались последние исследования в данной области [7, 8]. Вопросы автоматического выбора защитных мер представлены во многих работах, например в [9]. В ряде работ рассматривается аспект оценивания уровня риска на основе графов атак и графов зависимостей сервисов [6–8]. Некоторые авторы используют экономические индексы для оценивания возможных потерь и эффективности контрмер [10, 11]. Так, в работе [11] контрмеры оцениваются по трем параметрам, на основе которых определяется общий выигрыш от реализации k -й контрмеры:

$$Net_Benefit_k = Benefit_k - Added_Cost_k + Added_Profit_k, \forall k = \{1, 2, 3, \dots, l\},$$

где l — количество контрмер; $Benefit_k$ — выигрыш от реализации k -й контрмеры; $Added_Cost_k$ — затраты на k -ю контрмеру; $Added_Profit_k$ — дополнительная польза от реализации k -й контрмеры.

В работе [7] предлагается показатель выбора контрмер для реагирования на атаки на основе графов зависимостей сервисов — *показатель возврата инвестиций в реагирование (Return-On-Response-Investment — RORI)*:

$$RORI = \frac{RG - (CD + OC)}{CD + OC},$$

где RG — эффективность реагирования; CD — побочные потери при реагировании; OC — затраты на контрмеры. Для реализации выбирается контрмера с наибольшим значением показателя RORI.

В статье [12] представлен модифицированный показатель RORI, учитывающий вариант отсутствия контрмер, а также размер инфраструктуры системы:

$$RORI = \frac{(ALE \times RM) - ARC}{ARC + AIV} \times 100,$$

где ALE — ожидаемые годовые потери (соответствуют последствиям негативного события в слу-

чае отсутствия контрмер), которые зависят от критичности и вероятности реализации атаки; RM — уровень снижения риска в случае реализации контрмеры; ARC — ожидаемые годовые затраты на реализацию контрмеры; AIV — годовые затраты на инфраструктуру (оборудование, поддержку) в случае реализации защитной меры.

Кроме того, следует учитывать существующие стандарты в области выбора контрмер. Вопросы выбора контрмер рассмотрены, например, в ГОСТ Р ИСО/МЭК ТО 13335-4-2007 «Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Часть 4. Выбор защитных мер». В этом стандарте риск используется для определения того, требуются ли защитные меры. В стандарте отмечено, что при выборе защитных мер важно сравнивать расходы по реализации защиты со стоимостью активов и оценивать возврат вложений с точки зрения снижения рисков. Кроме того, защитные меры не должны снижать функциональные возможности системы.

Настоящие исследования ориентированы на системы управления информацией и событиями безопасности. В этой области наиболее продвинутыми работами являются, например, [7, 12]. В статье предлагается развитие существующих подходов с использованием расширенного набора показателей и многоуровневого подхода, использующего, в том числе, семейство стандартов, применяемых в протоколе SCAP [13]. Авторами разработана методика выбора защитных мер, которая учитывает их влияние на угрозы, уязвимости и воздействия, а также общий уровень риска с учетом подхода к оценке защищенности системы на основе графов атак [3].

Описание подхода

Модель контрмер

Для учета контрмеры в общем подходе к поддержке принятия решений по реагированию на атаки необходимо сформировать модель контрмер.

Поскольку в данном исследовании используются стандарты протокола SCAP [13] для автоматизации оценки защищенности, рассмотрим соответствующие стандарты описания контрмер: стандарты CRE [4] и ERI [5]. Хотя стандарты еще находятся в процессе разработки и не сформирована полная база данных, использующая указанные стандарты, они подходят для создания модели контрмер.

Стандарт CRE является схемой определения и описания контрмер в формате XML [4]. Стандарт ERI содержит дополнительную информацию к CRE [5].

В настоящей статье в модель контрмеры (рис. 1) предполагается включить:

1) поля стандарта CRE: текстовое описание элемента (метод и действие контрмеры); платформу

Поля:

Название	Описание	CSE или CVE	Платформа	Влияние на граф атак	Влияние на работу	Эффективность	Стоимость
----------	----------	-------------	-----------	----------------------	-------------------	---------------	-----------

Пример значений полей

Запрет или перенаправление запросов	Запрет или перенаправление url запросов от подозрительных учетных записей	CVE-2010-1870	сре:/a:apache:struts:2.0.0	Удаление связи	$CD = [0\ 0\ 0.5]$	$CE = [0.5\ 0.5\ 0.5]$	500 €
-------------------------------------	---	---------------	----------------------------	----------------	--------------------	------------------------	-------

■ **Рис. 1.** Модель контрмеры

с использованием языка CPE Applicability Language 2.3, для которой применима данная контрмера;

2) поля стандарта ERI: индикаторы (ссылки на CSE [14] или CVE [15]); влияние на работу — отрицательное влияние на свойства безопасности активов, выражается показателем *уровень побочного ущерба (CollateralDamage — CD)* в виде трехмерного вектора $[CD_c\ CD_i\ CD_a]$, где CD_c , CD_i , CD_a — соответственно ущерб для свойств конфиденциальности/целостности/доступности в результате реализации контрмеры; эти параметры принимают значения от 0 до 1;

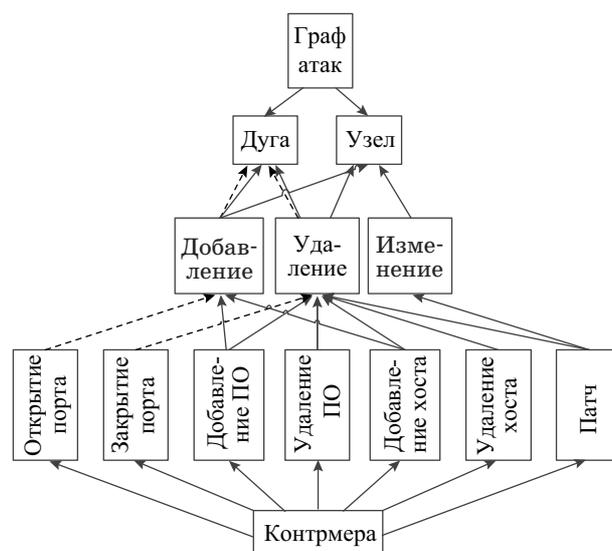
3) дополнительные поля: название контрмеры; тип влияния на граф атак — удаление, добавление или изменение связи в графе (поле принимает значения {REMOVE[CVE1-CVE2], ADD[CVE1-CVE2], MODIFY[CVE1-CVE2]});

4) показатели: *эффективность контрмеры (Countermeasure Effectiveness — CE)* — степень исправления свойства безопасности в виде трехмерного вектора $[CE_c\ CE_i\ CE_a]$, где CE_c , CE_i , CE_a — соответственно значения эффективности исправления свойств конфиденциальности/целостности/доступности в результате реализации контрмеры; эти параметры принимают значения от 0 до 1; *стоимость контрмеры (Countermeasure Cost — CC)* — стоимость реализации контрмеры, измеряется в денежных единицах.

В качестве демонстративного примера рассмотрим следующие варианты контрмер: патч для уязвимости (информацию можно взять, например, из базы xForce [16, 17], которая содержит временные оценки CVSS, в том числе *уровень исправления*, который определяет наличие патча для уязвимости); удаление уязвимого программного обеспечения; закрытие порта; добавление дополнительных защитных средств (например, фаервола или антивируса).

Связь модели контрмер и графа атак

В основе методики принятия решений лежит граф атак. Граф атак представляет собой граф переходов состояний, в котором каждый узел соответствует успешной/неуспешной эксплуата-



■ **Рис. 2.** Зависимости между контрмерами и объектами графа атак

ции уязвимости, а дуга — возможности перехода от одного атакующего действия к другому [19]. Реализация контрмеры влияет на переходы состояний и, соответственно, изменяет граф атак (удаляя/добавляя узлы) и вероятности атак. Очевидно, что контрмера может повлиять на каждый из этих элементов тремя способами: удалением, добавлением, изменением (например, вероятности атак) (рис. 2). Пунктирными и сплошными стрелками выделены пути, соответствующие определенным контрмерам, например, открытие порта обуславливает добавление дуги, но не узла.

Расширение таксономии показателей

В соответствии с работами [3, 19] для построения таксономии показателей используется комплексная иерархическая система показателей, позволяющих на разных уровнях (топологическом, графа атак, атакующего, событий и системы) и с учетом различных аспектов (основных показателей, показателей нулевого дня и стоимостных показателей) отразить текущий уровень защищенности.

Показатели топологического уровня определяются администратором на основе топологии системы (сети) [3].

На уровне графа атак для вычисления показателей защищенности используется информация, получаемая на основе графа атак. Данный уровень позволяет определить вероятность атаки и возможный ущерб с учетом всех путей атаки [3].

На уровне атакующего вводится зависимость от профиля атакующего (т. е. его положения в сети и навыков). Это позволяет сформировать так называемый профильный граф атак, который включает атаки, которые может реализовать именно данный атакующий [3].

Уровень событий соответствует динамическому режиму работы системы оценивания защищенности [3]. Он позволяет отслеживать развитие атаки и профиль атакующего по событиям безопасности. На основе поступающих событий корректируется позиция атакующего на графе атак и возможные пути продолжения атаки.

На уровне системы определяются общий уровень защищенности системы и поверхность атаки системы.

Основные показатели каждого уровня представлены на рис. 3, где пунктирными стрелками обозначены необязательные связи.

В соответствии с определенной моделью контрмер необходимо расширить таксономию показателей защищенности за счет введения допол-

нительных показателей в модель контрмер: стоимости контрмеры, эффективности контрмеры и уровня побочного ущерба.

Связь уровня принятия решений и остальных уровней таксономии

Рассмотрим ниже связь уровня принятия решений с четырьмя другими уровнями: топологическим, графа атак, атакующего и событий.

Топологический уровень

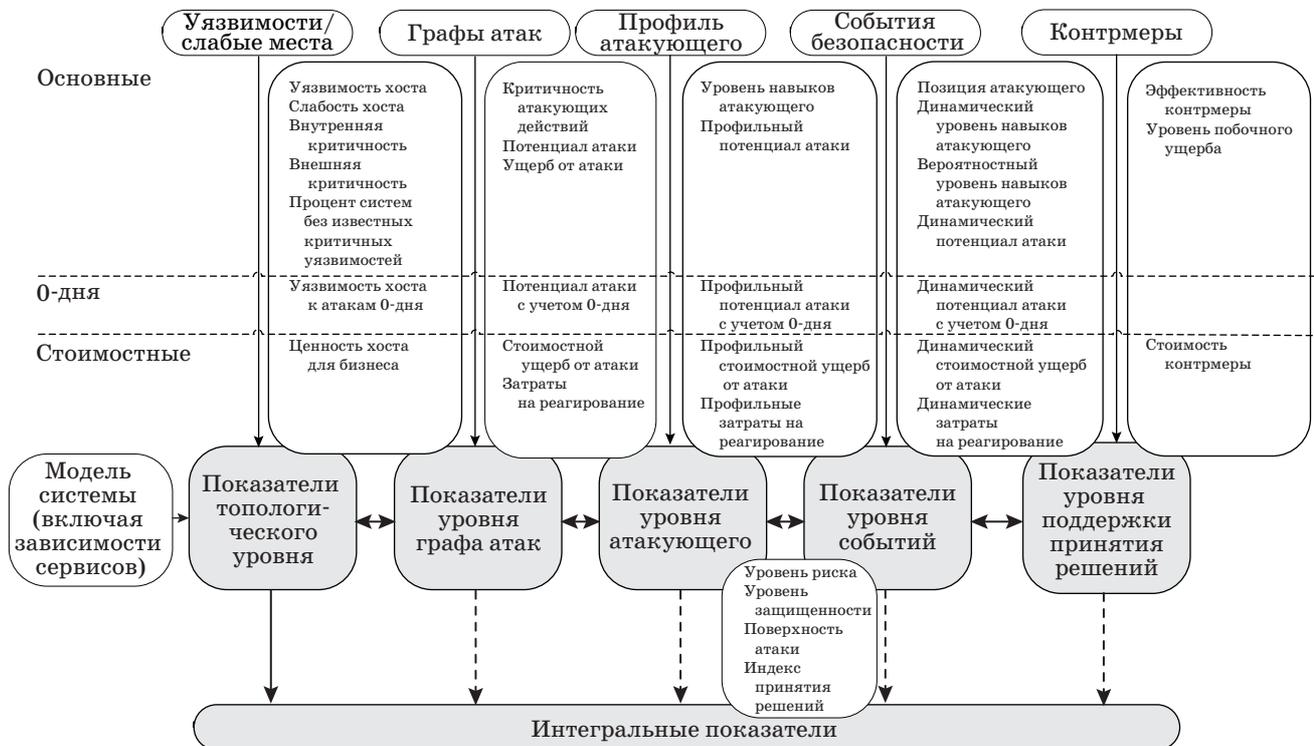
На данном уровне не рассматриваются многошаговые атаки, использующие множество уязвимостей. Как следствие, не учитывается влияние контрмер на граф атак. Поэтому принятие решений основано на использовании уровня риска для отдельных активов, который определяется при помощи контекстной оценки CVSS (от 0 до 10) [18]:

$$Risk = round_to_1_decimal(AdjustedBase),$$

где $AdjustedBase = BaseScore$, в котором $BaseScore Impact$ заменен на $AdjustedImpact$;

$$AdjustedBase = round_to_1_dicimal \times ((0,6AdjustedImpact + 0,4Exploitability - 1,5) \times f(AdjustedImpact));$$

$$AdjustedImpact = \min(10; 10,41 \times (1 - (1 - ConfImpact \times ConfReq) \times (1 - IntegImpact \times IntegReq) \times (1 - AvailImpact \times AvailReq))),$$



■ Рис. 3. Расширенная таксономия показателей защищенности

где $ConfImpact$, $IntegImpact$, $AvailImpact$ — влияние на конфиденциальность, целостность и доступность; $ConfReq$, $IntegReq$, $AvailReq$ — требования безопасности, которые в данном контексте рассматриваются как критичность актива, поэтому

$$AdjustedImpact = \min(10; 10,41 \times (1 - (1 - ConfImpact \times Criticality(c))(1 - IntegImpact \times Criticality(i)) \times (1 - AvailImpact \times Criticality(a))))$$

где $Criticality(c)$, $Criticality(i)$ и $Criticality(a)$ — критичность конфиденциальности, целостности и доступности актива соответственно. Значения определяются экспертами в зависимости от возможных потерь организации. Возможные значения показателей критичности: [0; 1,51];

$$Exploitability = 20 \times AccessVector \times AccessComplexity \times Authentication,$$

где $AccessVector$ — вектор доступа; $AccessComplexity$ — сложность доступа; $Authentication$ — аутентификация;

$$f(AdjustedImpact) = \begin{cases} 0, & \text{если } AdjustedImpact = 0 \\ 1,176, & \text{если } AdjustedImpact \neq 0 \end{cases}$$

Методика выбора контрмер на данном уровне реализуется в несколько этапов.

1. Выявление активов с неприемлемым уровнем риска, т. е. «высокой» контекстной (environmental) CVSS-оценкой согласно системе CVSS (от 7,0 до 10,0).

2. Определение временной (temporal) CVSS-оценки на предмет того, не уменьшится ли значение риска с реализацией патча. Оценка определяется на основе временного уравнения CVSS, использующего только один дополнительный показатель — *уровень исправления (RemediationLevel)*, который определяет наличие патча для уязвимости [18]: $TemporalScore = round_to_1_decimal(BaseScore \times RemediationLevel)$, где функция $round_to_1_decimal$ выполняет округление аргумента до одного знака после запятой. Временная CVSS-оценка имеет значение от 0 до 10. Если уровень риска для актива становится ниже 7,0, то система рекомендует применить патчи для соответствующих уязвимостей.

3. Для активов с высокой оценкой уровня риска определяются четыре аспекта: риск нарушения конфиденциальности/целостности/доступности и получения привилегий нелегитимным пользователем (в соответствии с CVSS-данными по уязвимости, определившей оценку риска). Для этого используются показатели $ConfImpact$, $IntegImpact$, $AvailImpact$ и $ConfReq$, $IntegReq$, $AvailReq$ следующим образом: реализация контрмер необходи-

ма для обеспечения соответствующего свойства безопасности, если $ConfImpact$, $IntegImpact$ или $AvailImpact \geq 0,275$ (т. е. ущерб есть), и если требования $ConfReq$, $IntegReq$, $AvailReq$ для этого свойства $> 1,0$ (т. е. критичность высокая). Необходимо перебрать все уязвимости с «высокой» оценкой риска, относящиеся к данному активу. В случае если уязвимость дает возможность получения привилегий, необходимо применять контрмеры.

4. В зависимости от того, какие аспекты безопасности могут быть нарушены, выбираются контрмеры для обеспечения соответствующих свойств безопасности (например, дополнительная аутентификация в случае риска нарушения конфиденциальности). В модели контрмер это заложено в оценках показателей эффективности $[CE_c, CE_i, CE_a]$: если $CE_c \neq 0$, то соответствующую контрмеру можно использовать против нарушения конфиденциальности; если $CE_i \neq 0$ — против нарушения целостности; если $CE_a \neq 0$ — против нарушения доступности.

5. Для выбора контрмер используется следующий подход. Интуитивно понятно, что необходимо увеличить выигрыш от реализации защитных мер при снижении затрат. Выигрыш определяется отношением риска до реализации защитных мер к риску после реализации защитных мер. Чем меньше будет риск после реализации защитных мер, тем больше будет данная величина. Затраты, нормализованные согласно шкале критичности, помещаются в знаменатель. Таким образом, с увеличением затрат данный показатель уменьшится, и наоборот. Показатель *индекс принятия решения (Countermeasure Index — CI)*, используемый для выбора защитных мер, определим следующим образом:

$$CI = \frac{R_b}{R_a \times CC},$$

где R_b — риск в случае, если защитные меры не реализованы; R_a — риск в случае, если защитные меры реализованы.

Уровень графа атак, уровень атакующего и уровень событий

На уровне *графа атак* рассматриваются узлы графа атак с уровнем риска, превышающим приемлемый. Для таких узлов рассматривается возможность реализации защитных мер в соответствии с классификацией на рис. 2. На данном уровне применяются методы вычисления уровня риска, определенные для графа атак [3, 19, 20]. На *уровне атакующего* дополнительно учитываются возможности нарушителя.

На *уровне событий* контрмеры реализуются в зависимости от текущих и будущих (спрогнозированных) шагов нарушителя. При этом учитывается «глубина графа до критичного ресурса», которая определяется как количество узлов

графа до актива с высоким уровнем критичности. Если данная глубина превышает определенное значение, то система ждет нового события для уточнения своих оценок; если глубина меньше определенного значения, система предлагает контрмеру на основе имеющихся данных со степенью точности, соответствующей количеству уже выявленных релевантных событий.

Описание case study

Описание тестовой сети и возможных контрмер

Для демонстрации выбран фрагмент сети из сценария ATOS для проекта MASSIF [1]. Фрагмент тестовой сети представлен на рис. 4 [1].

■ Описание программного обеспечения

Хост	Программное обеспечение
Веб-сервер Accreditation (Massif-2)	Windows Server 2008 R2 (64 bits); JBoss AS 5.0.1; Snare agent; ApacheStruts2 framework
Веб-сервер Sport Entries (Massif-1)	Windows Server 2008 R2 (64 bits); JBoss AS 5.0.1; Snare agent; ApacheStruts2 Framework (cpe:/a:apache:struts:2.0.0)
Сервер аутентификации Authentication (Massif-3)	SUSE Enterprise Linux 11 SP1 (32 bits) (cpe:/o:novell:suse_linux:11:sp1:server)
	NetIQ eDirect server 8.8.7.1 (cpe:/a:netiq:edirectory:8.8.7.1)

В таблице [1] описано программное обеспечение тестовой сети. Структуру сервисов тестовой сети определим следующим образом: для аутентификации используется NetIQ eDirect, доступ к данным eDirect осуществляется по протоколу LDAP, инкапсулированному в SSL (порт 636); веб-приложения Accreditation и Sport Entries задействуют ApacheStruts2 framework (использует порт 8080 для доступа к веб-страницам), поддерживаемый JBoss AS (использует порт 443).

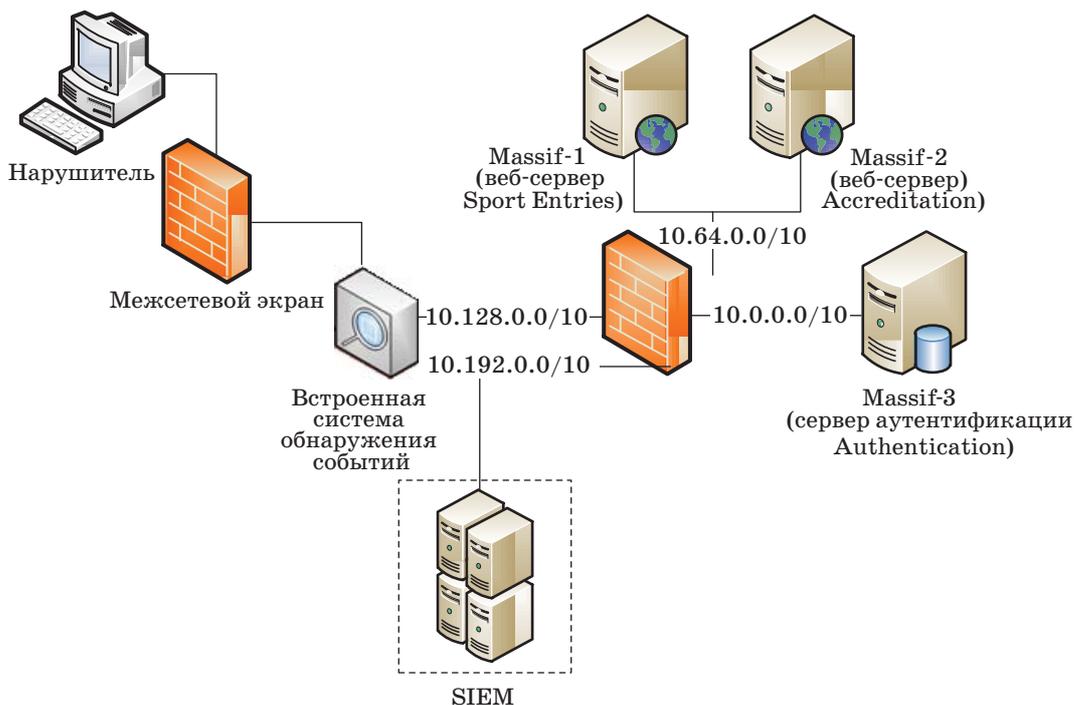
Граф зависимостей сервисов

Граф зависимостей сервисов (рис. 5) построен в соответствии с методикой, предложенной в работе [7]: зависимость определяется необходимостью доступности, целостности и конфиденциальности сервиса для обеспечения доступности, целостности и конфиденциальности другого сервиса. Сервисы предоставляются различными приложениями хостов системы или сетевыми устройствами.

Для вычисления показателей необходимо задать весовые матрицы зависимостей (задаются экспертами).

Вычисление показателей для выбора контрмер

Для описанного фрагмента сети и атаки на веб-сервер Massif-2 определим индекс принятия решения. Для этого необходимо найти уровень риска до и после внедрения контрмер. Для упрощения вычислений выберем топологический уровень.



■ Рис. 4. Схема фрагмента тестовой сети

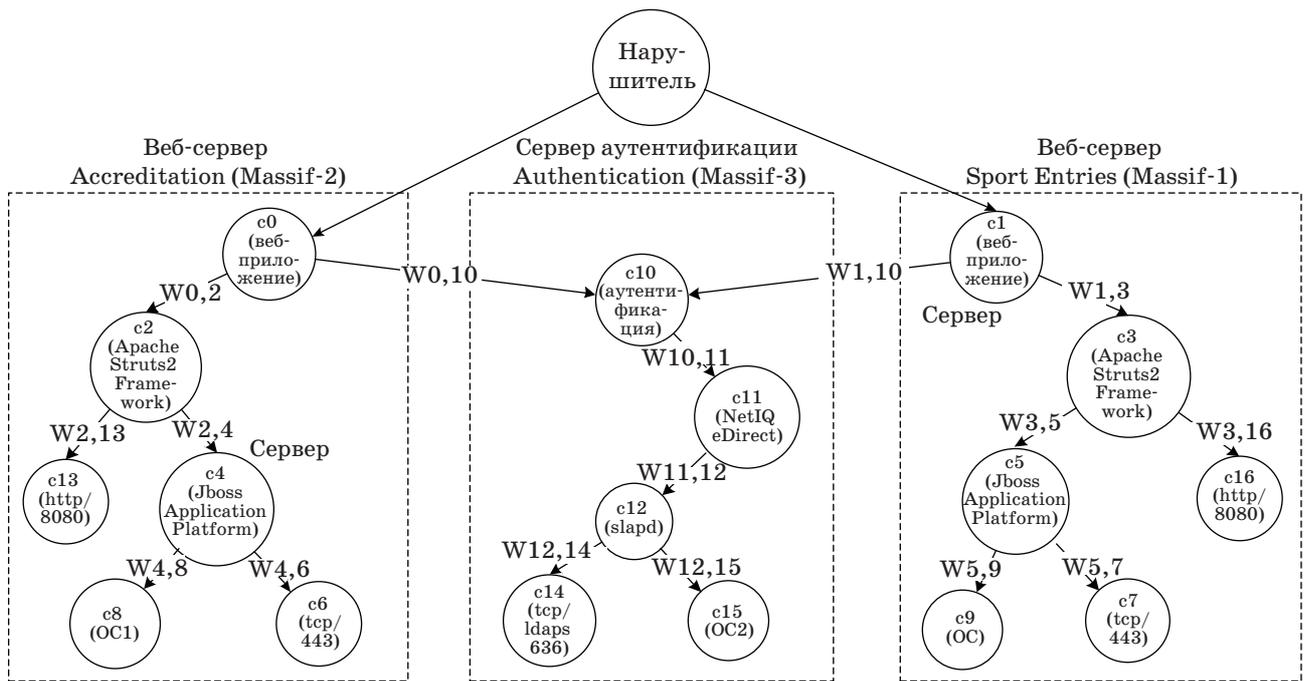


Рис. 5. Зависимости сервисов

На топологическом уровне риск атаки на веб-сервер Massif-2 до внедрения контрмер определим следующим образом. Вначале вычислим критичность активов (в данном случае, это информация на веб-серверах): $Criticality(c) = 0,8$, $Criticality(i) = 0,8$ и $Criticality(a) = 0,8$.

Далее необходимо оценить риск до внедрения контрмер в соответствии с формулой для топологического уровня, определенной выше. Например, для узла Massif-2 он будет определен в соответствии с максимальной CVSS-оценкой уязвимостей хоста — уязвимостью ApacheStruts2 Framework CVE-2013-4316 (10,0 Н; AV:L/AC:L/Au:N/C:C/I:C/A:C).

Отметим, что хотя сам сервис ApacheStruts2 Framework не отмечен как критичный для системы, тем не менее сохранение его свойств безопасности необходимо для сохранения свойств безопасности веб-приложения в соответствии с весо-

вой матрицей: $W_{0,2} = \begin{bmatrix} 0,7 & 0,7 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$. Критичность

ApacheStruts2 Framework будет определяться как $Criticality(c) = 0,56$, $Criticality(i) = 0,8$ и $Criticality(a) = 0,8$.

Уязвимость представлена с помощью идентификаторов CVE [15], базовой оценки CVSS по шкале от 1 до 10 и соответствующего качественного значения (Н — высокая, М — средняя, L — низкая оценка критичности уязвимости) и базовых векторов CVSS: AV:[L,A,N]/AC:[H,M,L]/

Au:[M,S,N]/C:[N,P,C]/I:[N,P,C]/ A:[N,P,C], где AV — вектор доступа к уязвимости (L — локальный, A — смежная сеть, N — удаленный); AC — сложность доступа к уязвимости (Н — высокая, М — средняя, L — низкая); Au — показатель того, требуется ли дополнительная аутентификация (М — требуется пройти несколько процедур аутентификации, S — требуется пройти одну процедуру аутентификации, N — не требуется); C, I и A — ущерб, наносимый конфиденциальности, целостности и доступности в результате успешной эксплуатации уязвимости соответственно (N — нет, P — частичный, C — полный) [19].

Поскольку ущерб является полным, то согласно системе оценивания CVSS $ConfImpact$ (C), $IntegImpact$ (I) и $AvailImpact$ (A) имеют значения 0,660. Тогда

$$AdjustedImpact = \min(10; 10,41 \times (1 - (1 - 0,660 \times 0,56) \times (1 - 0,660 \times 0,8) \times (1 - 0,660 \times 0,8))) = 8,948.$$

Вектор доступа определяется как локальный, что согласно системе оценивания CVSS соответствует значению 1,0; сложность доступа определяется как низкая, что соответствует значению 0,71; аутентификация не требуется, что соответствует значению 0,704. Таким образом:

$$Exploitability = 20 \times 1,0 \times 0,71 \times 0,704 = 9,9968, \\ f(AdjustedImpact) = 1,176;$$

$$\begin{aligned} AdjustedBase &= \\ &= round_to_1_dicimal(((0,6 \times 8,948) + \\ &+ (0,4 \times 9,9968) - 1,5) \times 1,176) = 9,3; \\ Risk &= AdjustedBase = 9,3. \end{aligned}$$

Определим риск после внедрения контрмер. Для примера возьмем контрмеру 1 «блокировка подозрительных учетных записей» (в случае которой эффективность $CE_{c1} = 0,75$ и стоимость $CC_1 = 0,0001$) и контрмеру 2 «активация многофакторной аутентификации» ($CE_{c2} = 0,85$ и $CC_2 = 0,0001$):

$$\begin{aligned} AdjustedImpact_1 &= 8,948, \\ AdjustedImpact_2 &= 8,948; \\ Exploitability_1 &= \\ &= 20 \times 1,0 \times 0,71 \times 0,704 \times 0,75 = 7,4976, \\ Exploitability_2 &= 8,4973; \\ f(AdjustedImpact_1) &= 1,176, \\ f(AdjustedImpact_2) &= 1,176; \\ AdjustedBase_1 &= \\ &= round_to_1_dicimal(((0,6 \times 8,948) + \\ &+ (0,4 \times 7,4976) - 1,5) \times 1,176) = 8,1, \\ AdjustedBase_2 &= \\ &= round_to_1_dicimal(((0,6 \times 8,948) + \\ &+ (0,4 \times 8,4973) - 1,5) \times 1,176) = 8,5; \\ Risk_1 &= AdjustedBase_1 = 8,1, \\ Risk_2 &= AdjustedBase_2 = 8,5. \end{aligned}$$

Соответственно, коэффициенты выбора контрмер

$$\begin{aligned} CI_1 &= \frac{R_b}{R_{a1} \times CC_1} = \frac{9,3}{8,1 \times 0,0001} = 11\,481,5; \\ CI_2 &= \frac{9,3}{8,5 \times 0,0001} = 10\,941,2. \end{aligned}$$

Максимальный коэффициент используется для выбора защитных мер. Таким образом, будет

выбрана контрмера «блокировка подозрительных учетных записей».

Были проведены эксперименты для различных сетевых топологий и различных наборов входных данных. Эксперименты подтвердили, что благодаря дополнительной информации на каждом новом уровне можно выбрать более эффективные защитные меры (с меньшей стоимостью и позволяющие минимизировать ущерб).

Тем не менее индекс принятия решений имеет ряд ограничений. Так, например, он не применим в случае нулевой стоимости защитных мер и в случае нулевого риска после внедрения защитных мер. В дальнейшем планируется модифицировать индекс для устранения этого недостатка.

Заключение

Предложен подход к выбору контрмер в системах управления информацией и событиями безопасности, основанный на многоуровневой системе показателей защищенности. Для выбора контрмер применяются показатели оценки эффективности и целесообразности применения контрмер.

Особенностью предложенного подхода является возможность предоставления решения по выбору контрмер в любой момент времени в зависимости от имеющихся в наличии входных данных о текущей ситуации по уровню защищенности как в статическом, так и в динамическом режимах функционирования системы. Приведен пример применения подхода для простого сценария атаки на фрагменте тестовой сети.

В дальнейшем планируется продолжить серию экспериментов по определению эффективности предложенного подхода на различных компьютерных сетях при реализации различных атак.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (13-01-00843, 14-07-00697, 14-07-00417, 15-07-07451) и программы фундаментальных исследований ОНИТ РАН (контракт № 1.5).

Литература

1. MASSIF FP7 Project. MAnagement of Security information and events in Service Infrastructures. <http://www.massif-project.eu> (дата обращения: 02.04.2015).
2. Котенко И. В., Саенко И. Б., Полубелова О. В., Чечулин А. А. Применение технологии управления информацией и событиями безопасности для защиты информации в критически важных инфраструктурах // Тр. СПИИРАН. 2012. Вып. 1(20). С. 27–56.

3. Kotenko I. and Doynikova E. Security Assessment of Computer Networks based on Attack Graphs and Security Events // Proc. of the 2014 Asian Conf. on Availability, Reliability and Security, LNCS, 2014. P. 462–471.
4. McGuire G. T., Waltermire D., Baker J. O. Common Remediation Enumeration (CRE) Version 1.0 (Draft) // NIST Interagency Report 7831 (Draft). — National Institute of Standards and Technology, Dec. 2011. — 33 p.
5. Johnson C. Enterprise Remediation Automation // Proc. of the IT Security Automation Conf., Sept. 27–29, 2010. NIST. <http://csap.nist.gov/events/2010/itsac/>

- presentations/day1/Automation_Specifications-Enterprise_Remediation_Automation.pdf (дата обращения: 02.04.2015).
6. **Kotenko I., Stepashkin M.** Attack Graph based Evaluation of Network Security // Proc. of the 10th IFIP Conf. on Communications and Multimedia Security (CMS'2006), Heraklion, Greece, 2006. P. 216–227.
 7. **Kheir N.** Response Policies and Counter-Measures: Management of Service Dependencies and Intrusion and Reaction Impacts: PhD thesis. — Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications de Bretagne, 2010. — 229 p.
 8. **Poolsappasit N., Dewri R., Ray I.** Dynamic Security Risk Management Using Bayesian Attack Graphs // IEEE Transactions on Dependable and Security Computing. 2012. Vol. 9. N 1. P. 61–74.
 9. **Balepin I., Maltsev S., Rowe J., Levitt K.** Using Specification-Based Intrusion Detection for Automated Response // Proc. of 6th Intern. Symp., RAID 2003, Pittsburgh, PA, USA, Sept. 8–10, 2003. Lecture Notes in Computer Science, 2003. P. 136–154.
 10. **Cremonini M. and Martini P.** Evaluating Information Security Investments from Attackers Perspective: the Return-On-Attack (ROA) // Workshop on the Economics of Information Security (WEIS'05), 2005. <http://infosecnet.net/workshop/pdf/23.pdf> (дата обращения 02.04.2015).
 11. **Hoo K. J. S.** How Much is Enough? A Risk-Management Approach to Computer Security: PhD thesis. — Stanford University, June 2000. — 99 p.
 12. **Grenadillo G. G., Debar H., Jacob G., Achemlal C. G. M.** Individual Countermeasure Selection Based on the Return on Response Investment Index // Lecture Notes in Computer Science. 2012. Vol. 7531. P. 156–170.
 13. **Waltermire D., Quinn S., Scarfone K., Halbardier A.** The Technical Specification for the Security Content Automation Protocol (SCAP): SCAP Version 1.2. Sept. 2011. <http://csrc.nist.gov/publications/nistpubs/800-126-rev2/SP800-126r2.pdf> (дата обращения: 02.04.2015).
 14. **Common Configuration Enumeration (CCE):** <http://cse.mitre.org/> (дата обращения: 02.04.2015).
 15. **Common Vulnerabilities and Exposures (CVE):** <http://cve.mitre.org/> (дата обращения: 02.04.2015).
 16. **X-Force:** <http://xforce.iss.net/> (дата обращения: 02.04.2015).
 17. **Федорченко А. В., Чечулин А. А., Котенко И. В.** Исследование открытых баз уязвимостей и оценка возможности их применения в системах анализа защищенности компьютерных систем и сетей // Информационно-управляющие системы. 2014. № 5. С. 72–79.
 18. **Mell P., Scarfone K.** A Complete Guide to the Common Vulnerability Scoring System Version 2.0, 2007. — 23 p.
 19. **Котенко И. В., Степашкин М. В., Дойникова Е. В.** Анализ защищенности автоматизированных систем с учетом социо-инженерных атак // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2011. № 3. С. 40–57.
 20. **Котенко И. В., Новикова Е. С.** Визуальный анализ для оценки защищенности компьютерных сетей // Информационно-управляющие системы. 2013. № 3. С. 55–61.

UDC 004.056

doi:10.15217/issn1684-8853.2015.3.60

Countermeasure Selection in Security Management Systems

Kotenko I. V.^a, Dr. Sc., Tech., Head of Laboratory of Computer Security Problems, ivkote@comsec.spb.ru

Doynikova E. V.^a, Junior Researcher, doynikova@comsec.spb.ru

^aSaint-Petersburg Institute for Informatics and Automation of RAS, 39, 14 Line, V. O., 199178, Saint-Petersburg, Russian Federation

Purpose: Manual processing of security-related information can result in omitting important aspects and, finally, in taking inefficient countermeasures. The aim of this research is the automation of countermeasure selection by security-related information processing. **Results:** The technique is developed for countermeasure selection in the process of managing security information and events. This technique is based on a newly proposed integrated system of security metrics representing the security state of the system. For countermeasure selection, the system of security metrics is extended with an additional level of decision support. The new level is based on the metrics of countermeasure effectiveness. The key features of the proposed technique include using graphs of attacks and service dependencies, applying the suggested countermeasures and security metrics, and also the possibility to give a countermeasure decision at any time, according to the current information on security state and events. **Practical relevance:** The developed technique can help to improve the efficiency of decision-making in the systems of security information and event management.

Keywords — Security Incidents, Monitoring, Response, Security Metrics, Countermeasure Selection, Attack Graphs, Graphs of Service Dependencies.

References

1. *MASSIF FP7 Project. Management of Security information and events in Service Infrastructures.* Available at: <http://www.massif-project.eu> (accessed 02 April 2015).
2. Kotenko I. V., Saenko I. B., Polubelova O. V., Chechulin A. A. Application of Security Information and Event Management Technology for Information Security in Critical Infrastructures. *Trudy SPIIRAN*, 2012, iss. 1(20), pp. 27–56 (In Russian).
3. Kotenko I. and Doynikova E. Security Assessment of Computer Networks based on Attack Graphs and Security

- Events. *Proc. of the 2014 Asian Conf. on Availability, Reliability and Security, LNCS*, 2014, pp. 462–471.
4. McGuire G. T., Waltermire D., Baker J. O. Common Remediation Enumeration (CRE) Version 1.0 (Draft). *NIST Interagency Report 7831 (Draft)*, National Institute of Standards and Technology, December 2011. 33 p.
 5. Johnson C. Enterprise Remediation Automation. *Proc. of the IT Security Automation Conf.*, September 27–29, 2010. NIST. Available at: [http://csap.nist.gov/events/2010/itsac/resentations/day1/Automation Specifications-Enterprise Remediation Automation.pdf](http://csap.nist.gov/events/2010/itsac/resentations/day1/Automation%20Specifications-Enterprise%20Remediation%20Automation.pdf) (accessed 02 April 2015).
 6. Kotenko I., Stepashkin M. Attack Graph based Evaluation of Network Security. *Proc. of the 10th IFIP Conf. on Communications and Multimedia Security (CMS'2006)*, Heraklion, Greece, 2006, pp. 216–227.
 7. Kheir N. *Response Policies and Counter-Measures: Management Of service Dependencies and Intrusion and Reaction Impacts*. PhD thesis. Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications de Bretagne, 2010. 229 p.
 8. Poolsappasit N., Dewri R., Ray I. Dynamic Security Risk Management Using Bayesian Attack Graphs. *IEEE Transactions on Dependable and Security Computing*, 2012, vol. 9, no. 1, pp. 61–74.
 9. Balepin I., Maltsev S., Rowe J., Levitt K. Using Specification-Based Intrusion Detection for Automated Response. *Proc. of 6th International Symp., RAID 2003*, Pittsburgh, PA, USA, September 8–10, 2003. *Lecture Notes in Computer Science*, 2003, pp. 136–154.
 10. Cremonini M. and Martini P. Evaluating Information Security Investments from Attackers Perspective: the Return-On-Attack (ROA). *Workshop on the Economics of Information Security (WEIS'05)*, 2005. Available at: <http://infoseccon.net/workshop/pdf/23.pdf> (accessed 02 April 2015).
 11. Hoo K. J. S. *How Much is Enough? A Risk-Management Approach to Computer Security*. PhD thesis. Stanford University, June 2000. 99 p.
 12. Grenadillo G. G., Debar H., Jacob G., Achemlal C. G. M. Individual Countermeasure Selection Based on the Return on Response Investment Index. *Lecture Notes in Computer Science*, Springer-Verlag, 2012, vol. 7531, pp. 156–170.
 13. Waltermire D., Quinn S., Scarfone K., Halbardier A. *The Technical Specification for the Security Content Automation Protocol (SCAP): SCAP Version 1.2*. September 2011. Available at: <http://csrc.nist.gov/publications/nistpubs/800-126-rev2/SP800-126r2.pdf> (accessed 02 April 2015).
 14. *Common Configuration Enumeration (CCE)*. Available at: <http://cce.mitre.org/> (accessed 02 April 2015).
 15. *Common Vulnerabilities and Exposures (CVE)*. Available at: <http://cve.mitre.org/> (accessed 02 April 2015).
 16. *X-Force*. Available at: <http://xforce.iss.net/> (accessed 02 April 2015).
 17. Fedorchenko A. V., Chechulin A. A., Kotenko I. V. Open Vulnerability Bases and their Application in Security Analysis Systems of Computer Networks. *Informatsionno-upravliaushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2014, no. 5, pp. 72–79 (In Russian).
 18. Mell P., Scarfone K. *A Complete Guide to the Common Vulnerability Scoring System Version 2.0*. 2007. 23 p.
 19. Kotenko I. V., Stepashkin M. V., Doynikova E. V. Protection Analysis of Information Systems Taking into Account Social Engineering Attacks. *Problemy informatsionnoi bezopasnosti. Komp'iuternye sistemy*, 2011, no. 3, pp. 40–57 (In Russian).
 20. Kotenko I. V., Novikova E. S. Visual Analysis of Computer Network Security Assessment. *Informatsionno-upravliaushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2013, no. 3, pp. 55–61 (In Russian).

УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

Научная электронная библиотека (НЭБ) продолжает работу по реализации проекта SCIENCE INDEX. После того как Вы регистрируетесь на сайте НЭБ (<http://elibrary.ru/defaultx.asp>), будет создана Ваша личная страничка, содержание которой составят не только Ваши персональные данные, но и перечень всех Ваших печатных трудов, имеющих в базе данных НЭБ, включая диссертации, патенты и тезисы к конференциям, а также сравнительные индексы цитирования: РИНЦ (Российский индекс научного цитирования), h (индекс Хирша) от Web of Science и h от Scopus. После создания базового варианта Вашей персональной страницы Вы получите код доступа, который позволит Вам редактировать информацию, помогая создавать максимально объективную картину Вашей научной активности и цитирования Ваших трудов.

МЕТОДИКА АНАЛИЗА ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ НАРУШИТЕЛЯ СРЕДСТВАМИ СИСТЕМ ФИЗИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ

В. В. Волхонский^а, доктор техн. наук, доцент

С. Л. Малышкин^а, аспирант

^аСанкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, РФ

Постановка проблемы: основным показателем эффективности средств обнаружения систем физической защиты является вероятность обнаружения нарушителя. Получение объективной оценки этого параметра сопряжено с такими трудностями, как субъективизм экспертных оценок и сложность использования экспериментальных результатов, особенно в задачах математического моделирования. **Цель исследования:** выбор и разработка объективных критериев эффективности и методики их применения в практических задачах анализа типовых средств обнаружения. **Методы:** структурирование диаграмм направленности на зоны необнаружения, обнаружения и уверенного обнаружения с оценкой их формы и размеров. **Результаты:** общие критерии достижения требуемой вероятности обнаружения при минимальном уровне ложных тревог и несовместности воздействий нарушителя на средства обнаружения дополнены сформулированными критериями полного перекрытия зоны обнаружения диаграммой направленности и минимума максимального расстояния обнаружения. Последовательное применение метода структурирования зон, оценки их формы и размеров и анализа вероятности обнаружения по сформулированным критериям может использоваться как методика оценки эффективности. Анализ по этой методике наиболее распространенных одиночных пассивных инфракрасных и радиоволновых извещателей и различных их пространственных структур, а также комбинированных извещателей показал, что как сами извещатели, так и их структуры в определенных условиях, в частности при радиальном направлении движения для пассивных инфракрасных и тангенциальном для радиоволновых устройств обнаружения нарушителя, имеют низкую вероятность обнаружения. Хотя и в меньшей степени, это относится и к комбинированным устройствам. Наиболее полно сформулированным критериям соответствуют ортогональные разнесенные комбинированные извещатели.

Ключевые слова — вероятность обнаружения, эффективность, зона обнаружения, средства обнаружения, извещатель, система физической защиты.

Введение

Вопросы обеспечения безопасности различных объектов, в первую очередь, таких как критической инфраструктуры, информатизации (каковыми в настоящее время, по сути, является подавляющее большинство объектов), культурного наследия и т. п. являются весьма важными. Один из важнейших элементов практически любой системы безопасности (информационной, антитеррористической, противокриминальной и др.) — это система физической защиты (СФЗ).

Для обнаружения несанкционированного проникновения (НП) нарушителя обычно используют систему охранной сигнализации как одну из важных составляющих СФЗ [1, 2]. При разработке и анализе эффективности таких систем первоочередной целью является достижение требуемой эффективности обнаружения НП. При решении этой задачи необходимо учитывать не только особенности выбора типа и мест установки средств обнаружения (СО), но и возможные методы воздействия на СО СФЗ квалифицированного нарушителя, обладающего априорными знаниями о принципах функционирования и параметрах СО, что снижает возможность его обнаружения. Поэтому очень

важно иметь объективную оценку эффективности функционирования СО при тех или иных видах действий нарушителя. Это позволяет, во-первых, разрабатывать более эффективные СФЗ, во-вторых, оценивать эффективность существующих систем и, наконец, осуществлять объективное сравнение разных систем и различных типов СО.

На основе методики [3] получения оценок вероятности обнаружения нарушителя при разных условиях проникновения исследуется [4, 5] вероятность обнаружения несанкционированного проникновения пассивными инфракрасными (ПИК) и комбинированными извещателями при различных направлениях и скоростях движения нарушителя. Но это исследование выполнено без привязки к структуре СО на объекте. Кроме того, использование экспериментальных данных работы [5] делает затруднительным математическое моделирование процессов проникновения и обнаружения. А другой распространенный подход к оценке ВО — применение экспертных оценок, — как известно, не обладает достаточной степенью объективности.

Различные варианты структур средств обнаружения на объекте рассматриваются в работах [6–9], однако выводы и рекомендации в них де-

лаются на основе общих рассуждений или опыта установки и эксплуатации различного типа СО, но не корректных методов оценки эффективности таких средств. Кроме того, для рассмотренных вопросов построения структуры СО на охраняемом объекте не выполнен анализ возможностей пропуска нарушителя при использовании им основных приемов, позволяющих ему остаться необнаруженным или, по крайней мере, снизить вероятность обнаружения.

Таким образом, возникают следующие задачи. Во-первых, выбора объективных критериев оценки эффективности, справедливых для различных типов СО и разных условий. Во-вторых, разработки методики применения этих критериев в задачах анализа и синтеза как собственно СО, так и структуры этих средств в составе СФЗ. И, в-третьих, практического применения этой методики к различным типам СО и структурам этих средств на объекте обеспечения физической безопасности.

Поскольку в настоящее время наиболее широко используемыми для обнаружения проникновения являются пассивные инфракрасные и радиоволновые (РВ) извещатели, то имеет смысл использовать их как примеры практических приложений. Тем более эти принципы обнаружения (ПИК и РВ) являются основой еще одного типа извещателей — комбинированных, также имеющих широкое применение на практике. Хотя многие результаты, полученные авторами, могут применяться и для других типов СО.

Основные критерии оценки

Основными критериями оценки эффективности для оптимизации структуры и алгоритмов работы СО НП может служить, прежде всего, достижение требуемой вероятности обнаружения $P_{об}$, а также низкой вероятности ложной тревоги $P_{л.т}$ и защищенности СО, т. е. способности сохранять свои характеристики при тех или иных приемах, применяемых нарушителем для преодоления системы охранной сигнализации.

Однако требования к реализации желаемых значений $P_{об}$ и $P_{л.т}$ противоречивы, поскольку увеличение вероятности обнаружения связано с необходимостью повышения чувствительности, в свою очередь приводящей к увеличению вероятности ложного срабатывания. И наоборот, снижение вероятности ложного срабатывания ведет к необходимости снижения чувствительности с соответствующим уменьшением вероятности обнаружения НП. Как известно, основное решение, позволяющее реализовать компромисс между вероятностями обнаружения и ложной тревоги, достигается путем использования комбинированных устройств [10].

В общем случае вероятность обнаружения будет функцией нескольких основных параметров. К числу наиболее важных можно отнести, прежде всего, эффективную отражающую/излучающую поверхность $G_{эф}$ нарушителя, скорость v , направление движения нарушителя, которое можно характеризовать углом φ относительно направления на СО, а также совокупность O^i контролируемых СО параметров объекта. Тогда вероятность обнаружения можно записать как функцию перечисленных выше параметров $P_{об}(G_{эф}, v, \varphi, O^i)$. Вероятность $P_{л.т}$ зависит от выбора параметров O^i и наличия совокупности факторов E^j , подобных по воздействию окружающей среде [11] как основной причине ложных тревог. Таким образом, в общем случае надо решать задачу выбора характеристик и параметров СО, а также структуры СО для оптимизации $P_{об}$ и $P_{л.т}$ по определенному критерию Ψ , например минимаксному:

$$\Psi \left\{ \max \left[P_{об} \left(G_{эф}, v, \varphi, O^i \right) \right], \min \left[P_{л.т} \left(O^i, E^j \right) \right] \right\}. \quad (1)$$

В частном случае, тем не менее, широко используемом на практике, можно обратиться к критерию достижения требуемого значения ВО при минимальном уровне ложных тревог.

Применение критерия (1) не исключает необходимости выполнения и критерия несовместности эффективных воздействий $S_n^{j\text{эф}}$ на j -е СО и $S_l^{k\text{эф}}$ на k -е СО нарушителем для снижения вероятности обнаружения, предложенного в работе [11]:

$$\bigcup_{n \in N} S_n^{j\text{эф}} \cap \bigcup_{l \in L} S_l^{k\text{эф}} = \emptyset, \quad j \in J, k \in K. \quad (2)$$

В этом выражении совокупность эффективных воздействий нарушителя $S_n^{j\text{эф}}$ включает в себя множество $\mathbf{B}^j = [B_1^j, B_2^j, \dots, B_M^j]$ из M возможных пассивных способов воздействия B_n^j на j -е СО и совокупность L активных способов воздействия $\mathbf{A}^j = [A_1^j, A_2^j, \dots, A_L^j]$ на j -е СО.

Ограничимся случаем учета влияния факторов окружающей среды E^j и пассивных воздействий нарушителя \mathbf{B}^j в силу специфики применения активных воздействий.

Заметим, что выполнение критерия (2) требуется как при разработке самих извещателей, так и при формировании их структуры на объекте. Из числа возможных приемов нарушителя, снижающих вероятность его обнаружения, рассмотрим, прежде всего, такой наиболее доступный и эффективный способ воздействия нарушителя на один из каналов обнаружения, как выбор направления движения, при котором чувствительность одиночных СО или одного из каналов

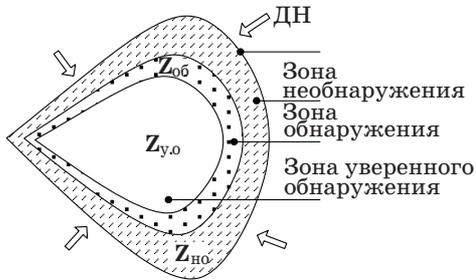
обнаружения комбинированных СО минимальна. Принимая во внимание ограничение диапазона скоростей движения, можно считать $v = \text{const}$ и $G_{\text{эф}} = \text{const}$, тогда критерий (1) упрощается и принимает вид

$$\Psi \left\{ \left[P_{\text{об}}^3(\varphi, \mathbf{O}^i) \right], \min \left[P_{\text{л.т}}(\mathbf{O}^i, \mathbf{E}^j) \right] \right\}. \quad (3)$$

При необходимости учет параметров v и G может быть выполнен по критерию, аналогичному (3) при $\varphi = \text{const}$.

Структура и параметры зон обнаружения

Применение критериев (1) и (3) к выбранным типам СО требует формализации структуры зон обнаружения этих средств. Воспользуемся подходом [13], основанным на структурировании диаграммы направленности (ДН) на зоны, в которых обнаружение нарушителя возможно с разной вероятностью: зона уверенного обнаружения с вероятностью не менее заданной; зона обнаружения с вероятностью менее заданного уровня и зона необнаружения, в которой уровень воздействия и (или) его продолжительность недостаточны для принятия решения об обнаружении. В этом случае ДН будет соответствовать зоне, в которой обнаружение возможно, но с раз-



■ Рис. 1. Структура диаграммы направленности

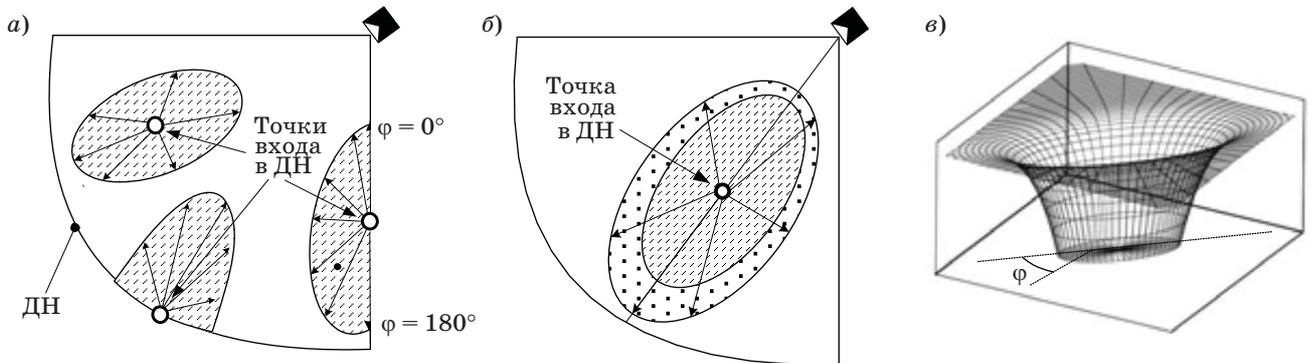
ной вероятностью, в том числе ниже заданной. Рис. 1 иллюстрирует сказанное для направления входа в ДН перпендикулярно ее границе, т. е. для $\varphi = 0^\circ$ (в направлении на СО) или для $\varphi = 90^\circ$ (сбоку ДН).

При этом ДН может быть представлена как множество пространственных точек $Z_{\text{ДН}}$, включающее в себя подмножества точек зон $Z_{\text{у.о}}$ уверенного обнаружения, $Z_{\text{об}}$ обнаружения и $Z_{\text{но}}$ необнаружения: $Z_{\text{ДН}} \subset Z_{\text{у.о}} \cup Z_{\text{об}} \cup Z_{\text{но}}$. Очевидно, что множество точек зоны уверенного обнаружения $Z_{\text{у.о}}$ может быть получено как результат разности множества $Z_{\text{ДН}}$ и суммы подмножеств $Z_{\text{об}}$ и $Z_{\text{но}}$, т. е. $Z_{\text{у.о}} = Z_{\text{ДН}} \setminus (Z_{\text{об}} \cup Z_{\text{но}})$.

С точки зрения вероятных способов НП необходимо учитывать возможности проникновения как извне, так и изнутри ДН. Исследования [5] позволяют сделать оценку характера формы зон уверенного обнаружения, обнаружения и необнаружения. На рис. 2, а показан случай входа нарушителя в ДН сбоку, т. е. поперек ДН, навстречу извещателю или внутри ДН с последующим произвольным направлением движения. Форма зон, в частности интересующая нас в первую очередь зона уверенного обнаружения, будет зависеть (при $\varphi = \text{const}$, $v = \text{const}$) от направления движения относительно СО, т. е. от значения угла φ .

Анализ возможной тактики поведения нарушителя при квалифицированном проникновении на объект позволяет говорить о необходимости учета возможности проникновения с любого направления [12]. Такой случай с точкой входа внутри ДН (рис. 2, б) является наиболее общим, другие — либо при входе в ДН на ее границе, либо при ограничении ДН размерами контролируемого помещения — можно рассматривать как частные случаи.

Более наглядным может быть трехмерное представление функции распределения расстояния обнаружения $F_{\text{об}}(L_{\text{ц}}, \varphi)$, $v = \text{const}$ (рис. 2, в) аналогичен двумерному графическому представлению на рис. 2, б).



■ Рис. 2. Зоны необнаружения с произвольными точками входа (а) и точкой входа внутри ДН в двумерном (б) и трехмерном (в) представлении

Заметим, что диаграммы на рис. 2 иллюстрируют форму зон, но не отражают распределение вероятности обнаружения по этим зонам.

Таким образом, в структуре ДН можно выделить зоны необнаружения и неуверенного обнаружения, в которых СО не решает поставленную задачу с требуемой вероятностью $P_{об}$. Тогда с точки зрения решаемой проблемы можно записать критерий полного перекрытия зоны обнаружения ДН, т. е. обязательного достижения требуемой вероятности обнаружения при любом направлении движения и любой точке входа:

$$((Z_{об} \cup Z_{но}) \cup Z_{ДН}) \setminus Z_{ДН} = 0. \quad (4)$$

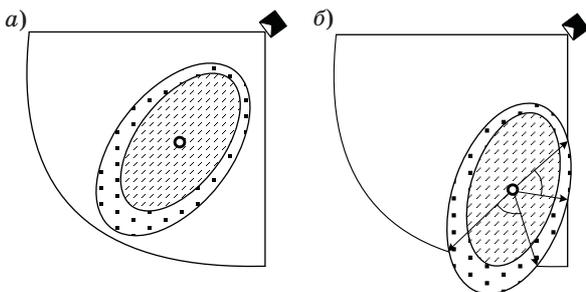
Выполнение условия (4) соответствует в графическом представлении рис. 3, а (при котором происходит обязательное обнаружение при любом направлении движения) и не соответствует рис. 3, б, когда есть направления, при движении в которых (выделенные сектора) нарушитель может остаться необнаруженным.

Кроме того, возможность движения нарушителя в произвольном направлении требует выравнивания чувствительности извещателя в этих условиях. С точки зрения формы зоны обнаружения это будет соответствовать требованию минимизации максимального расстояния обнаружения $X_{об}^{max}$ при любом направлении движения:

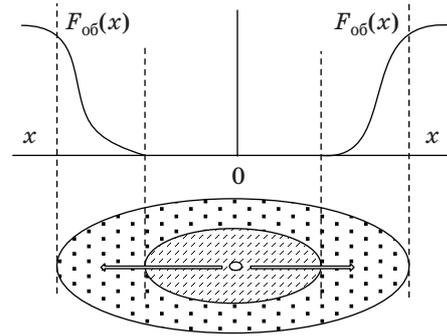
$$\min \{ \max X_{об}^{max} \}, \forall \varphi. \quad (5)$$

Использование критерия (4) для практических приложений, например для оценки надежности обнаружения, требует знания, кроме формы, также и размеров рассматриваемых зон. Требуемые размеры можно оценить, используя результаты работ [3–5]. В этом случае вероятность обнаружения нарушителя будет определяться как

$P_{об} = \int_0^{X_{об}^{max}} p(x_{об}) dx_{об}$, где $X_{об}^{max}$ — расстояние, на котором происходит обнаружение; $p(x_{об})$ — плотность распределения расстояния обнаружения; $x_{об}$ — расстояние, пройденное нарушителем от



■ Рис. 3. Зоны обнаружения, полностью (а) и частично (б) перекрывающиеся ДН



■ Рис. 4. Связь параметров зоны обнаружения с функцией распределения расстояния обнаружения

точки входа в ДН. На рис. 4 показаны зоны необнаружения и обнаружения и связанная с последней функция распределения.

Экспериментально полученные оценки $\hat{p}(x_i)$ (гистограммы) приводятся, к примеру, в статьях [5, 12]. Однако для этих функций желательно иметь аналитические выражения, которые могут быть получены путем аппроксимации гистограмм.

Как пример рассмотрим возможность такой аппроксимации. Для этого необходимо выполнить проверку гипотезы о соответствии выборочных гистограмм аппроксимирующему закону распределения. В частности, это может быть рас-

пределение Рэлея $p(t_3) = \frac{t_3}{\sigma_3^2} \exp \frac{-t_3^2}{2\sigma_3^2}$ со средним значением $m_3 = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \sigma_3$. Оценка точности аппроксимации была произведена по критерию согласия Пирсона χ^2 при рекомендуемом [14] уровне значимости 0,05. При этом математическое ожидание аппроксимирующего распределения бралось исходя из выборочной оценки \hat{m} , вычисленной для исходных экспериментальных распределений $\hat{p}(x_i)$.

Результаты оценки точности аппроксимации (значения χ^2) для различных значений скорости движения цели для выбранного распределения составили 0,15; 1,93 и 10,5 для $v = 0,3; 1,5$ и 3,0 м/с соответственно. При этом табличные значения $\chi_{\alpha=0,05}^2$ для значений степеней свободы $n = 4, 5, 4$ составили 9,49; 11,07 и 9,49 соответственно [14]. Имея таким образом полученные аналитические выражения, можно делать оценки размеров зон обнаружения для конкретных типов и структур СО.

Примеры анализа эффективности СО

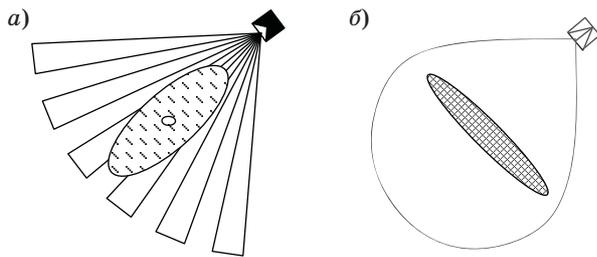
Проанализируем особенности оценки вероятности обнаружения для различных типов СО и их структур с учетом сформулированных выше критериев (2)–(5).

Одиночные СО

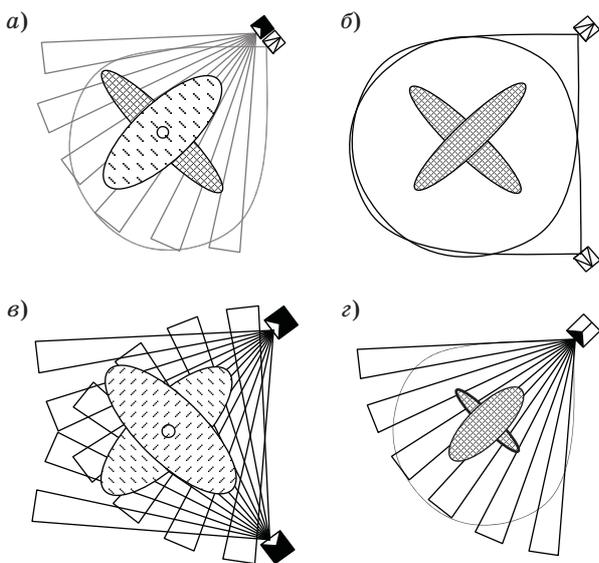
При использовании одиночного ПИК-извещателя перемещение нарушителя в радиальном направлении (рис. 5, а) будет приводить к существенному уменьшению ВО. Учитывая принцип действия РВ-извещателей [10], можно говорить об уменьшении вероятности обнаружения при тангенциальном направлении движения относительно них (рис. 5, б). То есть в этом случае имеет место невыполнение критерия (5) при выполнении (4).

Совмещенные СО

Очевидно, что для случая нескольких совмещенных или разнесенных СО необходимо перекрытие их ДН (рис. 6). С точки зрения сформулированных выше критериев ясно, что совмещение СО разного принципа действия в одном месте (рис. 6, а) приведет к росту как $P_{об}$, так и $P_{л.т}$. Пространственное разнесение СО одного принципа действия (рис. 6, б, в) позволит выполнить критерий (5), но при росте $P_{л.т}$, т. е. невыполнении критерия (3).



■ Рис. 5. Характер зоны обнаружения для одиночных ПИК- (а) и РВ-извещателей (б)



■ Рис. 6. Варианты структур нескольких устройств обнаружения: ПИК и РВ (а); двух РВ (б); двух ПИК (в) и комбинированного ПИК+РВ (г)

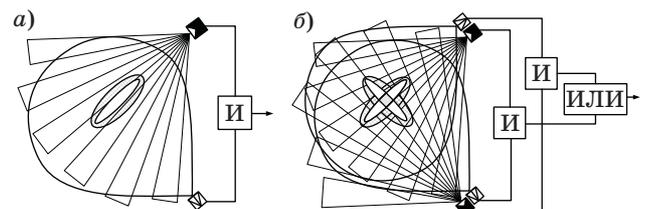
Комбинированные СО

Как известно, необходимость применения комбинированных устройств обнаружения вызвана требованием достижения высокой вероятности обнаружения при обеспечении низкого уровня ложных тревог. Добиться этого практически можно использованием двух каналов — ПИК- и РВ-обнаружения — с совмещением их ДН (рис. 6, г), увеличением чувствительности и принятием решения по алгоритму «И», что позволяет повысить чувствительность обоих каналов обнаружения и, следовательно, увеличить вероятность обнаружения.

Рост вероятности ложной тревоги при этом компенсируется использованием алгоритма «И» и правильным выбором принципов действия каналов, основанным на приведенном выше критерии несовместности воздействий, в данном случае окружающей среды, т. е. частного случая выражения (2) с учетом только окружающих условий $\bigcup_{n \in N} E_n^j \cap \bigcup_{l \in N} E_l^k = \emptyset$. Однако в случае с комбинированным извещателем есть возможность снизить вероятность обнаружения нарушителя только одним из каналов — $P_{об1}$ или $P_{об2}$. Тогда принцип несовместности воздействий нарушителя (2) не выполняется, и вследствие использования алгоритма «И» вероятность обнаружения в целом будет меньше наименьшей ВО каждого из каналов: $P_{об\Sigma} = P_{об1} \cdot P_{об2}$. Таким образом, у нарушителя будет возможность достаточно эффективно снизить вероятность своего обнаружения. Избежать этой проблемы позволяют ортогональные извещатели, предложенные в работе [6].

Разнесенные ортогональные комбинированные извещатели

Разнесенный ортогональный извещатель использует пару каналов обнаружения — РВ и ПИК, также работающих по алгоритму «И», но разнесенных в пространстве и развернутых относительно друг друга на угол $\varphi = 90^\circ$ по отношению к осям ДН (рис. 7, а). В этом случае направление движения нарушителя, тангенциальное для ПИК и радиальное для РВ, будет одинаково эффективно обнаруживаться обоими каналами. В такой структуре решается задача частичной оптимизации для одного из направлений движения.



■ Рис. 7. Ортогональные комбинированные одиночный (а) и сдвоенный (б) извещатели

Но при радиальном для ПИК- и тангенциальном для РВ-канала направлении вероятность обнаружения будет падать [невыполнение критерия (5)]. Однако такую структуру можно эффективно использовать при наличии естественных ограничителей потенциального направления движения нарушителя, когда известно наиболее вероятное направление движения.

Сдвоенные разнесенные ортогональные детекторы

Для устранения проблемы уменьшения вероятности обнаружения в предыдущей структуре можно использовать сдвоенный ортогональный извещатель (рис. 7, б). В этом случае выполняются все критерии (2)–(5) и задача оптимизации структуры СО решается достаточно корректно.

Заключение

Для оценки эффективности средств обнаружения наряду с общими критериями достижения требуемой вероятности обнаружения при минимальном уровне ложных тревог и несовместности

воздействий нарушителя на средства обнаружения целесообразно использовать сформулированные в работе критерии полного перекрытия зоны обнаружения ДН и минимума максимального расстояния обнаружения.

Предложенная в работе методика анализа эффективности заключается в последовательном структурировании ДН, оценке формы и размеров зон обнаружения и анализе вероятности обнаружения по сформулированным критериям.

Анализ по предложенной методике наиболее распространенных одиночных ПИК- и РВ-извещателей и различных их пространственных структур, а также комбинированных извещателей показал, что как сами извещатели, так и их структуры имеют в определенных условиях, в частности при радиальном направлении движения для ПИК- и тангенциальном для РВ-устройств обнаружения нарушителя, низкую вероятность обнаружения. Хотя и в меньшей степени, это относится и к комбинированным устройствам. Наиболее полно сформулированным критериям соответствуют ортогональные разнесенные комбинированные извещатели.

Литература

- ГОСТ Р 50922-2006. Защита информации. Основные термины и определения. — Введ. 1.02.2008. — М.: Стандартинформ, 2008. — 8 с.
- Волхонский В. В., Мальшкин С. Л. К вопросу единства терминологии в задачах физической защиты объектов // Информационно-управляющие системы. 2013. № 5. С. 61–68.
- Волхонский В. В. К вопросу повышения вероятности обнаружения несанкционированного проникновения на охраняемый объект // Вестник Воронежского института МВД России. 2011. № 4. С. 37–44.
- Богданов А., Багров В. Особенности характеристик обнаружения ПИК и совмещенных ПИК+РВ датчиков для помещений // Алгоритм безопасности. 2012. № 4. С. 72–73.
- Волхонский В. В., Воробьев П. А. Методика оценки вероятности обнаружения несанкционированного проникновения оптоэлектронным извещателем // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2012. № 1(77). С. 120–123.
- Волхонский В. В. Оптимизация структуры и алгоритмов работы комбинированных средств обнаружения проникновения нарушителя // Вестник Воронежского института МВД России. 2012. № 2. С. 91–97.
- Богданов А. В. и др. Руководство по созданию комплексной унифицированной системы обеспечения безопасности музейных учреждений, защиты и сохранности музейных предметов / А. В. Богданов, В. В. Волхонский, И. Г. Кузнецова, Г. Н. Костина, Н. В. Гормина, О. А. Боев, О. В. Сушкова, А. В. Иванов, О. Б. Алексеев. — СПб.: Инфо-да, 2014. Ч. II. — 264 с.
- Р 78.36.022-2012. Применение радиоволновых и комбинированных извещателей с целью повышения обнаруживающей способности и помехозащищенности: метод. пособие/ НИЦ «Охрана». — М., 2012. — 120 с.
- Р 78.36.036-2013. Методическое пособие по выбору и применению пассивных оптоэлектронных инфракрасных извещателей/ МВД РФ. — М., 2013. — 195 с.
- Волхонский В. В. Извещатели охранной сигнализации. Изд. 4-е, доп. и перераб. — СПб.: Экополис и культура, 2004. — 272 с.
- Волхонский В. В., Крупнов А. Г. Особенности разработки структуры средств обнаружения угроз охраняемому объекту // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. 2011. № 4(74). С. 131–136.
- Волхонский В. В., Воробьев П. А., Трапш Р. Р. Анализ уязвимостей объектов, контролируемых оптоэлектронными датчиками систем физической защиты // Вестник Воронежского института МВД России. 2013. № 2. С. 44–51.
- Волхонский В. В., Воробьев П. А. Анализ характеристик обнаружения нарушителя ПИК датчиками охранной сигнализации // Алгоритм безопасности. 2012. № 1. С. 44–46.
- Бендат Дж., Пирсол А. Измерение и анализ случайных процессов / под ред. И. Н. Коваленко. — М.: Мир, 1971. — 408 с.

UDC 654.924

doi:10.15217/issn1684-8853.2015.3.70

Analysis of Intruder Detection Efficiency in Physical Protection Systems

Volkhonskiy V. V.^a, Dr. Sc., Tech., Professor, volkhonski@mail.ru

Malyshkin S. L.^a, Post-Graduate Student, malyshkin-sl@mail.ru

^aSaint-Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, 49, Kronverkskii St., 197101, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: The main efficiency criterion for detection devices in physical protection systems is the intruder detection probability. Objective evaluation of this parameter can be difficult because the expert estimations are subjective, and experimental results are difficult to use, especially in mathematical simulation problems. **Purpose:** The goal of this research is to choose and develop objective criteria of efficiency and the technique of their application in practical problems of analyzing typical detection devices. **Method:** Structuring directional patterns for non-detection, detection and reliable detection zones with subsequent estimation of their forms and sizes. **Results:** General criteria for achieving the required detection probability with the lowest level of false alarms and the incompatibility of potential intruder’s impact onto the detector have been supplemented with formulated criteria for the full overlay of the detection zone by a directional pattern and for the minimum of the longest detection distance. Sequential application of the zone structuring method, estimation of the form and size of these zones, and the detection estimation analysis by the formulated criteria can be used as an efficiency estimation technique. Using it for analyzing the most common passive infrared, microwave and dual-technology detectors (along with their spatial structures) has shown that these detectors and their structures have a low level of detection probability under certain conditions, particularly, when the movement direction is radial (for passive infrared ones) or tangential (for microwave ones). The same is true for the dual technology, though to a smaller extent. Orthogonal spaced dual-technology detectors provide the best match to the formulated criteria.

Keywords —Detection Probability, Efficiency, Detection Zone, Detection Tools, Intruder Sensor, Physical Protection System.

References

1. State Standard R 50922-2006. Protection of Information. Basic Terms and Definitions. Moscow, Standartinform Publ., 2008. 8 p. (In Russian).
2. Volkhonskiy V. V., Malyshkin S. L. The Issue of Unity of Terminology in Physical Protection. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2013, no. 5, pp. 61–68 (In Russian).
3. Volkhonskiy V. V. About Task of Probability Detection Increasing During Unauthorized Penetration to Guarded Object. *Vestnik Voronezhskogo instituta MVD Rossii*, 2011, no. 4, pp. 37–44 (In Russian).
4. Bogdanov A., Bagrov B. Features of Detection Performance of PIR and Dual Tecnology PIR+RW Sensors for Rooms. *Algoritm bezopasnosti*, 2012, no. 4, pp. 72–73 (In Russian).
5. Volkhonskiy V. V., Vorob’ev P. A. Estimation Method of Unauthorized Intrusion Probability Detection by Passive Infrared Detector. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki*, 2012, no. 1(77), pp. 120–123 (In Russian).
6. Volkhonskiy V. V. Optimization of Structure and Operation Algorithms of Dual Technology Intrusion Detectors. *Vestnik Voronezhskogo instituta MVD Rossii*, 2012, no. 2, pp. 91–97 (In Russian).
7. Bogdanov A. V., Volkhonskiy V. V., Kuznecova I. G., Kostina G. N., Gormina N. V., Boev O. A., Sushkova O. V., Ivanov A. V., Alekseev O. B. *Rukovodstvo po sozdaniiu kompleksnoi unifitsirovannoi sistemy obespecheniia bezopasnosti muzeinykh uchrezhdenii, zashchity i sokhrannosti muzeinykh predmetov* [Guide to Creation of Complex Unified System of Museum Safety, Protection and Safety of Museum Objects]. Saint-Petersburg, Info-da Publ., 2014. Part II. 264 p. (In Russian).
8. Standard R.78.36.022-2012. *Primenenie radiovolnovykh i kombinirovannykh izveshchatelei s tsel’iu povysheniia obnaruzhivaiushchei sposobnosti i pomekhozashchishchennosti* [Application of Radio Radiowave and Dual Technology Detectors in order to Detectivity and Noise Immunity Increase]. Moscow, NITs “Okhrana” Publ., 2012. 120 p. (In Russian).
9. Standard R 78.36.036-2013. *Metodicheskoe posobie po vyboru i primeneniiu passivnykh optiko-elektronnykh infrakrasnykh izveshchatelei* [Methodical Manual on Choosing and Application of Passive Optical Electronic Infrared Detectors]. Moscow, MVD RF Publ., 2013. 195 p. (In Russian).
10. Volkhonskiy V. V. *Izveshchatelei okhrannoi signalizatsii* [Security Alarm Detectors]. Saint-Petersburg, Ekopolis i kul’tura Publ., 2004. 272 p. (In Russian).
11. Volkhonskiy V. V., Krupnov A. G. Special Features of the Threats Detectors Structure on Protected Object. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki*, 2011, no. 4(74), pp. 131–136 (In Russian).
12. Volkhonskiy V. V., Vorob’ev P. A., Trapsh R. R. Vulnerabilities Analysis of Objects Controlled by Passive Infrared Sensors of Physical Protection. *Vestnik Voronezhskogo instituta MVD Rossii*, 2013, no. 2, pp. 44–51 (In Russian).
13. Volkhonskiy V. V., Vorob’ev P. A. Analysis of Intruder Detection Performance of PIR intrusion sensors. *Algoritm bezopasnosti*, 2012, no. 1, pp. 44–46 (In Russian).
14. Bendat J. S., Piersol A. G. *Measurment and Analysis of Random Data*. New York, John Wiley & Sons, 1966. 390 p.

UDC 654.165

doi:10.15217/issn1684-8853.2015.3.77

AN EFFICIENT CROSS-LAYER AWARE MAPPING OF VOIP CALLS IN WIRELESS OFDMA SYSTEMS

Part II. Mapping Algorithms and their Performance

Y. Ben-Shimol^a, PhD, Electrical Engineering, Professor, benshimo@bgu.ac.il

I. Kitroser^a, PhD, Electrical Engineering, kitroser@bgu.ac.il

^aBen-Gurion University of the Negev, POB 653, 1, Ben Gurion St., Beer Sheva, 74105, Israel

Purpose: This work address and solve the problem of efficient broadcasting of resource allocations descriptors for VoIP traffic in mobile OFDMA-based wireless systems. **Methods:** We show that the mapping overhead is substantially reduced by using semi-persistent allocations and that by taking advantage of the periodicity of VoIP frames, generated by a multi-phase vocoder. To handle the impact of mobility on the characteristics of the wireless channel we utilize a cross-layer decision approach to track the channel conditions and predict the expected mobile user behavior such that the system may under-react to channel changes in some cases. **Results:** The development efforts in this paper were directed towards developing efficient heuristic solutions since the problem is NP hard. Two heuristic algorithms with low computational complexity of $O(n^2)$ are presented and their performance gains are compared against a simple persistent allocation approach. Extensive simulations show that these mapping algorithms reduce the allocation overhead substantially in OFDMA-based systems such as WiMAX and LTE. The main advantage of the proposed algorithms is their ability to support multiple codecs, or a single codec with different operational modes, that result in different packet sizes and different periods. In addition, our proposed algorithms cluster the assignments together hence enabling the BS to allocate unused resources to other traffic types. **Practical relevance:** The proposed algorithmic solutions are simple enough to be implemented in practical OFDMA systems such as WiMAX and LTE to allow an efficient use of bandwidth for high quality VoIP sessions in of mobile users.

Keywords — Cross-Layer Design and Optimization, Resource Allocation and Interference Management, Mobile Multimedia Technology, 3.5G and 4G Technologies.

Introduction

An important application in future IP based wireless communication networks is voice over IP (VoIP), which allows real-time voice calls between mobile stations (MSs). Most VoIP applications generate traffic of fixed size packets at a constant rate. Therefore, the traffic of a single VoIP session is classified as constant bit rate (CBR) traffic type and requires a fixed number of uplink (UL) resources on a periodic basis. This suggests that with a naive resource allocation scheme the up-link map (UL-MAP) includes allocation descriptors (or information elements — IEs) for VoIP streams, thus generating overheads at a constant rate. A typical voice call lasts several minutes on the average, while its packet period is usually up to several tens of milliseconds. This suggests that the total amount of overhead for each VoIP call is usually very large.

In part 1 of this paper [1] we underlined the necessary steps that are required for the implementation of a full cross-layer solution for the mapping overhead problem in the presence of mobility. Here we address the problem of the decision algorithm and present several new algorithms and an extension to the minimum overhead algorithm (MOA) [2] to efficiently support VoIP traffic under dynamic channel conditions. The algorithms use an efficient way to handle mobile channels and variations of the modulation and coding schemes (MCS) by using the finite state Markov chain

(FSMC) model that was presented in [1], for approximating and tracking the channel states.

We present a number of algorithmic solutions for persistent allocation, which fully complies with the messaging mechanism presented in [3, 4] (see [1] for a detailed discussion). Our proposed algorithms solve the problem of how to map slots to MSs such that the overall overhead is decreased. In this work we generalize the model given in [2] to support dynamic channels where the channel may change rapidly (i.e., mobile users in urban environment). This generalization enables us to model both codecs supporting silent suppression or adaptive rate and/or changes in the state of the mobile channel (and hence, supporting also variable MCS). Our proposed model enables us to uniformly represent an adaptive multi-rate (AMR) codec [5] with multiple states or multiple coders with different VoIP traffic parameters where none of the reviewed solution handles the multiple vocoder case. We show that our proposed algorithms reduce the mapping overhead for the dynamic cases as mentioned above, while keeping a simple and manageable resource allocation mechanism. In addition, the suggested algorithms cluster all VoIP assignments together, hence enabling easier resource management for other traffic types.

The rest of the paper is formed as follows: section “Problem definition” presents the problem and notations for the allocation problem; section

“Mapping schemes” presents the mapping algorithms for the mobile channels scenario along with the numerical results for the performance evaluation of the given algorithms. Summary and conclusions are given at the end of the paper.

Problem Definition

The definition of the efficient VoIP mapping problem is:

Definition. Given a sequence of allocation tables $A[k]$, $k = 0, 1, \dots, K$, and a set of requests $R = \{r_1, r_2, \dots, r_q\}$, find a set of non-overlapped allocations $S = \{S_1, S_2, \dots, S_q\}$ (i.e., $S_i^k \cap S_j^k = \emptyset, \forall i \neq j$), such that the mapping overhead is minimized.

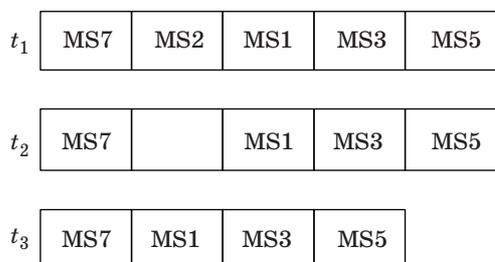
For the problem presented above we assume the following:

1) the solution needs to use the mechanism of persistence allocation. That is, the understanding that a user uses the last description for the allocated resources until (if at all), there is a change made by the base station (BS), and this change is presented as an information element (IE);

2) variations in the physical channel of each user are tracked continuously by a FSMC model. It is assumed that approximations for the states probabilities, transitions probabilities are known;

3) the metric for efficiency is the number of IEs used by the system.

Assumption 2 above implies that in cases of changes in channel state that need to be followed by reallocation for a user there is unallocated space (name a hole) that needs to be used in order to increase the efficiency of using the system resources. We provide a family of solutions and an explicit modification to the MOA such that the dynamic nature of the channel is taken into consideration. The main idea is to track the channel behavior of the MS and provide a predictor of the channel state changes probabilities and rates, which then can be used by the mapping algorithm. Such measures can indicate the stability of the channel,



■ **Fig. 1.** Illustration of resource hole and resource shifting for five resources. At t_1 there are 5 sub-bursts. At $t_2 > t_1$ MS2 is deleted, thus generating a hole. At $t_3 > t_2$ MS1, MS3 and MS5 are shifted to the right to fill the hole

which can be used as an allocation grouping criteria to reduce the number of holes in the allocation table. See Fig. 1 [3] for illustration of hole-filling operation, and later see the entropy mapper that is presented in Algorithms 2 and 3. In addition, we use the predictor of channel behavior, since rate assignments are later related to channel states. This also has implication on how to quantify the cost of state change in term of system resources and hence decides whether it is cost effective to perform an MCS state transition or just ignore it (see the Extended MOA (EMOA) mapper that is presented later).

Mapping Schemes with Dynamic Channels

In the static case presented in [2] the baseline mapping algorithm treated the VoIP data as regular data without using a persistent approach. Hence, the basic mapper’s overhead was directly related to the system load. In this work, we extend the MOA semi-fixed allocation mapper (SFAM) algorithm presented in [2] to efficiently support a dynamic channel scenario. We use the channel profile (as recommend in [6]) of a mixture of static, pedestrian and mobile users. In addition, to align with current IEEE 802.16 and 3GPP LTE traffic models, we use AMR as a primary voice codec with two working profiles. In order to evaluate our algorithms, we provide a simple persistent mapping algorithm, which complies with the persistent allocation mechanisms in IEEE 802.16-2009 [3] and 802.16m-2011 [4].

Simple persistent mapper

The simple persistent mapping (SPM) algorithm is a straightforward implementation of persistent allocation mechanism supported by [3, 4]. As stated in the problem definition, one of our goals is also to reduce the effective area of the overall VoIP allocations, meaning that the allocation area needs to be condensed, rather than letting it to spread over the entire resource domain. A possible motivation for this is to support other types of traffic, which may require consecutive resources for allocations. Essentially, this means that we would like to perform persistent allocation while eliminating resource “holes” and for this purpose we will use the resource shifting mechanism as supported by [3, 4].

The inputs to the SPM algorithm are lists of new and active requests and a current frame number k . We denote a request r with period p_r in *NewRequests* and *ActiveRequests* by a and n , respectively. The list is sorted according to the requests allocation slot index. The output of the simple persistent algorithm is the UL-MAP that is represented by a list of information elements (IEL). We use the function *Allocate*(r, s_i, k, IEL) (depicted in Algorithm 1) for allocating request r at slot s_i in frame k . The func-

tion allocates the required slots in line 2 and updates the index of next available slot for allocation in line 7. In lines 4–5, the function allocates a new UL-MAP allocation element m_r^k only if there was a change in the number of calculated for the last allocation for this request.

The SPM algorithm is depicted in Algorithm 2. The SPM algorithm starts by scanning the *ActiveRequests* for changes in request size due to an MCS change or due to collision with other active requests in this frame. Each such request is moved to the *NewRequests* list. Next, we search for holes between the active request allocations. Each such hole is eliminated either by filling a new request or by using the resource shifting procedure, which shifts all subsequent active requests. The computational complexity of SPM follows from the number of required operations to map an instance of requests. For any on-line mapping of a given set of requests, at least one operation is required for mapping each request. Therefore, the complexity of any mapper is at least $O(n)$ and this holds for the standard mapper. The complexity of the proposed mapping algorithms can be separated into operations that take place before and during the mapping process. For the pre-mapping operations, assuming that the mappers' input is not ordered with relation to the periodicity of the requests, $O(n \cdot \log n)$ operations are required to sort the requests according to their periodicity. The worst case scenario for SPM of mapping one request may require considering all other input requests, therefore mapping all requests requires $O(n^2)$ operations.

Algorithm 1. Allocate

Input: $\{r, k; s_i, \text{IEL}\}$

1. $m_r^k = \emptyset$
2. $S_r^k = \{s_i, s_{i+1}, \dots, s_{\bar{N}_r-1}\}$
3. remove r from *NewRequests*
or *ActiveRequests*
4. if $S_r^k \neq S_r^{k-p_r}$ then
5. $m_r^k \leftarrow \{s_i, \bar{N}_r\}$
6. end if
7. $s_i \leftarrow s_i + \bar{N}_r$
8. $\text{IEL} = \text{IEL} \cup \{m_r^k\}$

The Entropy Mapper

We note that in the case of a dynamic environment, MSs may change their MCS profiles, hence creating holes. In such cases, the simple persistent algorithm will try to fill the holes with a new request or perform resource shifting. Resource shifting invokes an additional system cost since it requires an additional MAP IE. As stated earlier in the section discussing general channels, we are interested in channel dynamics and managing a FSMC to

track channel conditions by estimating each state's steady state probability π_k [given by equation (12) in [1]]. As can be seen from Fig. 2, $a-d$, the state probabilities change and become more diverse as the channel conditions degrade. This means that for mobile users, the state transition probabilities increase, therefore the number of the required slots for allocation varies more frequently.

Our objective is to identify such MSs and reduce the number of operation required to condense the allocation region due to frequent MCS changes. By grouping such MSs at the end of the allocation region we decrease the number of holes that are created due to MCS changes, or at least decrease the number of shift operations. We use an entropy measure to

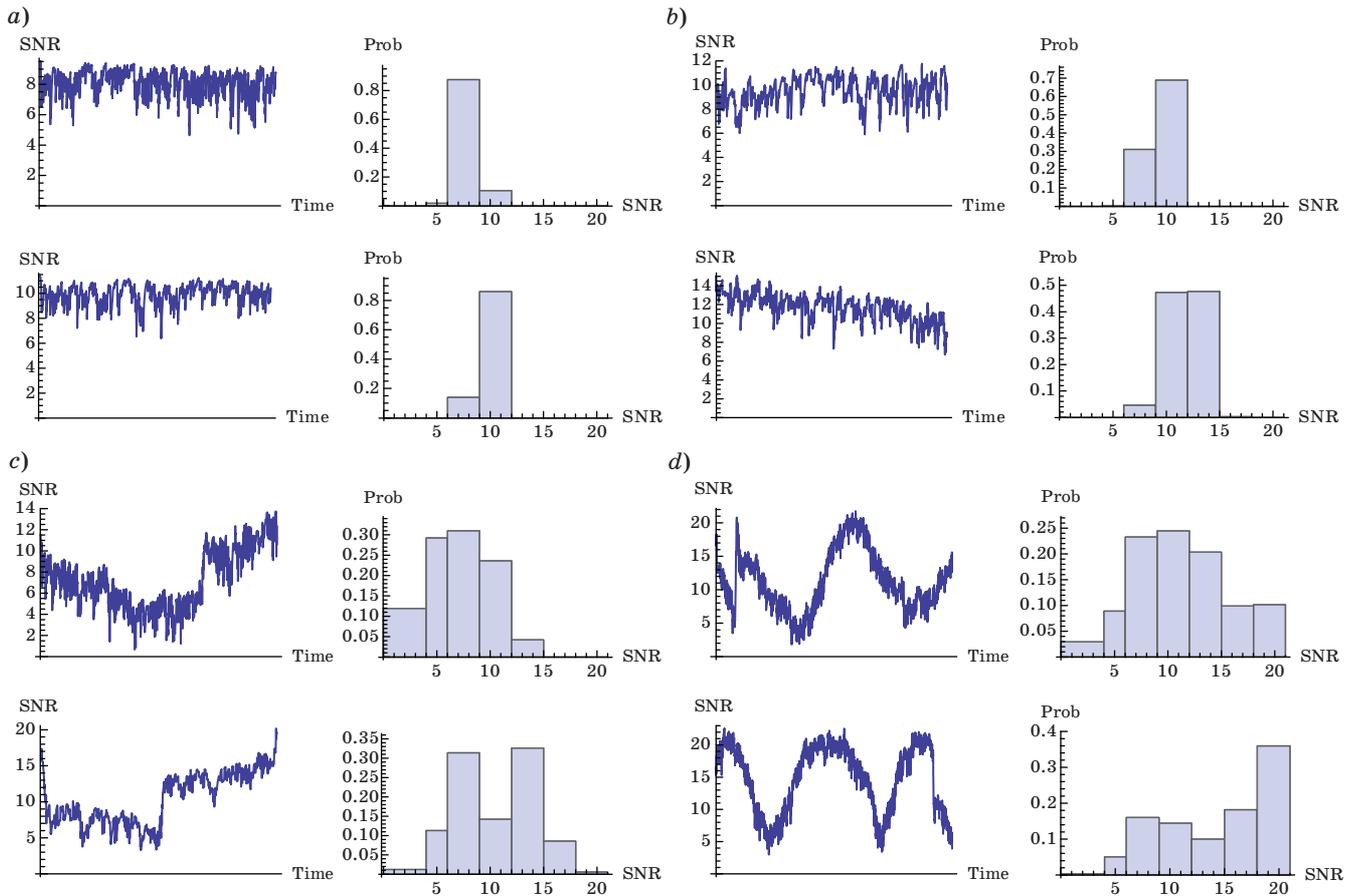
Algorithm 2. SPM

Input: $\{\text{NewRequests}, \text{ActiveRequests}, k; \text{IEL}\}$

1. $\text{slot} = 0; \text{IEL} = \emptyset; r = \emptyset;$
2. for $a_i \in \text{ActiveRequests}$ do
3. if $\bar{N}_{a_i}^k \neq \bar{N}_{a_i}^{k-p_{a_i}}$ OR
 $\exists a_j \neq a_i, \{S_{a_i}^k \cap S_{a_j}^k \neq \emptyset \mid a_j \in \text{ActiveRequests}\}$
then
4. remove a_i from *ActiveRequests*
and prepared a_i to *NewRequests*;
5. end if
6. end for
7. while $s_{a_1} = \text{slot}$ do
8. Allocate ($a_1, k, \text{slot}, \text{IEL}$)
9. end while
10. if *ActiveRequests* $\neq \emptyset$ then
11. $\text{hole} = s_{a_1} - \text{slot}$
12. else
13. goto Step 22
14. end if
15. $r \leftarrow \max\{n_i \in \text{NewRequests} \mid \bar{N}_{n_i} \leq \text{hole}\}$
16. if $r \neq \emptyset$ then
17. Allocate ($r, k, \text{slot}, \text{IEL}$);
18. else
19. ShiftResources ($\text{slot}, \text{hole}, \text{IEL}$);
20. end if
21. goto Step 7;
22. while *NewRequests* $\neq \emptyset$ do
23. Allocate ($n_1, k, \text{slot}, \text{IEL}$)
24. end while
25. return IEL

identify the dynamics of each MCS. Let $\pi_0(t), \dots, \pi_K(t)$ denote the state probabilities of a FSMC at time instance t , where each state corresponds to an MCS level. The entropy $H_i(t)$ of MS i at time t is defined as

$$H_i(t) = - \sum_{k=0}^K \pi_k(t) \log \pi_k(t). \quad (1)$$



■ **Fig. 2.** Two examples of SNR behavior in time and the FSMC histogram for: *a* — static MSS; *b* — Pedestrian MSS (3 km/h); *c* — Vehicular MSS (30 km/h); *d* — Vehicular MSS (120 km/h)

We note that given two MSs i, j with $H_i(t) \geq H_j(t)$, the channel of MS i is “more dynamic” than that of MS j . The entropy measure provides a simple yet effective improvement to the simple persistent allocation simply by sorting the new requests in increasing order of their entropy measure. Hence, we can define the Entropy Mapper algorithm as depicted by Algorithm 3.

Algorithm 3. Entropy

Input: {*NewRequests*, **H**, *ActiveRequests*, k ; IEL}
 1. Sort *NewRequests* according to **H**;
 2. IEL \leftarrow SPM {*NewRequests*, *ActiveRequests*, k };

The argument **H** is a vector of all corresponding $H_i(k)$ values for a current time frame k . It is assumed that each MS calculates this value and that there is a feedback mechanism to report this value to the BS. The complexity of the Entropy Mapper algorithm is same as for SPM algorithm, that is, $O(n^2)$.

Extended MOA

The next algorithm we present here is an extension to the MOA described in [2]. The EMOA modi-

fies the MOA in order to handle dynamic channels. The main idea is to track the channel using the FSMC and maintain both the state probabilities $\pi_0(t), \dots, \pi_K(t)$ and the transition probabilities [according to (12) and (13), respectively, given in [1]]. It is assumed that the FSMC states are sorted in a non-decreasing order according to the supported rates $r_i, i = 0, \dots, K$, hence $r_0 \leq r_1 \leq \dots \leq r_K$. If there is no MCS change, that is, no state transition in the corresponding FSMC, then the MS’s request is treated regularly by MOA. But if there is an MCS change, for example from i to j , then the algorithm calculates a cost function to decide whether to comply with the channel conditions and change the MCS or not. The cost function compares the loss due to the decision to remain in state i compared to the overhead required to change to MCS j . The main motivation here is that if the current change is merely a jitter, that is, the channel will return to state i fast enough, then the loss due to staying in the same MCS is tolerable comparing to the overhead induced by the MOA to re-map the request.

Let $COST_{IE}$ denote the cost of a MAP-IE for indicating an allocation. Also, let $E_{i,k}$ denote the average number of steps to first enter state k when starting

from state i . $E_{i,k}$ is calculated by solving the expression for the hitting time [see [1] for expression (15)]. We can see that if $|i - k| \leq 1$ and there is a bound of maximum allowed $L \leq K$ steps, we need to solve $\min\{\lfloor L/2 \rfloor, K - k\}$ equations for the case of $i = k + 1$ and $\min\{\lfloor K/2 \rfloor, k\}$ equations for $i = k - 1$. Finally, let \overline{COST}_{IE} denote the average cost in terms of MAP-IEs added in the MOA due to a hole created by changing an active request to a new request due to an MCS change. In MOA, such a hole may be filled by using another active request, which must be re-allocated and may create an additional hole.

Equation (2) denotes a cost function that quantifies (in terms of slots) the relative cost for user m when the system moves from system state i to system state j , using the ratio between the predicted system loss if the state change is ignored (not changing the specific allocation of the user) and the system loss due to re-allocation of the user due to the state change:

$$Cost_{i,j}(m) = \frac{F(i,j) \cdot E_{j,i}}{Slots(2(COST_{IE} + \overline{COST}_{IE}))}. \quad (2)$$

$F(i, j)$ is a function of the change direction:

$$F(i, j) = \begin{cases} Slots(PKT_{bits}(m))_{SNR_i} - \\ -Slots(PKT_{bits}(m))_{SNR_j}, & i < j \\ Slots \left(\begin{array}{l} \bar{N}(P_j(PKT_{bits}(m))) - \\ -\bar{N}(P_i(PKT_{bits}(m))) \end{array} \right), & i > j \end{cases}, \quad (3)$$

where $Slots(B)_{SNR}$ is the number of slots required to transmit B bits with a given SNR and $Slots(B)$ denote the corresponding number of slots using the SNR for the UL-MAP message. $\bar{N}(P_i(PKT_{bits}(m)))$ defines the number of bits required on the average to transmit a voice packet of size $PKT_{bits}(m)$. Here, we assume that not changing the system state results with a higher bit error rate (BER). Hence, on the average, the system may suffer from packet loss and will be required to retransmit the voice packet, which will result in system's goodput loss. We calculate $\bar{N}(\cdot)$ as follows: Let p^i denote the system bit error probability in state i with $SNR = SNR_i$. Then,

$$P_i(PKT_{bits}) = 1 - \prod_{i=1}^{PKT_{bits}} (1 - p^i) \quad (4)$$

denotes the packet error probability of a packet with PKT_{bits} bits. Note that since the system state is not changed, $P_j(PKT_{bits})$ represents the packet error probability of a packet with PKT_{bits} where the system is in state i and with $SNR = SNR_i$.

The probability of m consecutive packet transmissions (due to errors) is obtained from a geomet-

ric probability thus, the average number of transmitted packets is be given by

$$N(P_i(PKT_{bits})) = \sum_{m=1}^{\infty} m \cdot P_i^m(PKT_{bits}). \quad (5)$$

Taking a practical bound of no more than T_{max} retransmissions (thus maximal number of transmissions equals T_{max}) we get:

$$\bar{N}(P_i(PKT_{bits})) = \sum_{m=1}^{T_{max}} m \cdot P_i^m(PKT_{bits}). \quad (6)$$

The modified MOA calculates $Cost_{i,j}(m)$ for each user m at a transition change $i \rightarrow j$ in order to decide whether to change the state or not. The decision basically compares the cost of changing the state or not. If $Cost_{i,j}(m) > 1$ than the user's MCS state is changed, otherwise the system remains at the current MCS level.

Algorithm 4. EMOA

Input: {*NewRequests*, *PendingRequests*, *ActiveRequests*, k ; IEL}

1. for $a_i \in ActiveRequests$ do
2. if $State_{a_i}^k \neq State_{a_i}^{k-P_{a_i}}$ then
3. Calculate $Cost(State_{a_i}^{k-P_{a_i}}, State_{a_i}^k)(a_i)$ according to equation (2);
4. if $Cost(State_{a_i}^{k-P_{a_i}}, State_{a_i}^k)(a_i) > 1$ then
5. move request a_i from *ActiveRequests* to *NewRequests*;
6. else
7. move request a_i from *ActiveRequests* to *PendingRequests*;
8. set $TS_{a_i} = k$; $E_{a_i} = E(State_{a_i}^{k-P_{a_i}}, State_{a_i}^k)$;
9. end if
10. end if
11. end for
12. for $a_j \in PendingRequests$ do
13. if $State_{a_j}^k = State_{a_j}^{TS_{a_j}-P_{a_j}}$ then
14. move request a_j from *PendingRequests* to *ActiveRequests*;
15. else if $TS_{a_j} - k > E_{a_j}$ then
16. move request a_j from *PendingRequests* to *NewRequests*;
17. end if
18. end for
19. IEL $\leftarrow MOA\{NewRequests, \{ActiveRequests \cup PendingRequests\}, k\}$

We note that if we don't change the MCS level, we calculate the actual cost of this decision by finding the actual overhead that resulted as a function of time. If the actual overhead exceeds the cost

of changing the state, we change the current state. If, at any given time, the system returns to state i , the process is stopped.

The EMOA is depicted in Algorithm 4. We added two parameters for each request r : TS_r and E_r . TS_r denotes a time stamp to tag the frame in which the request was moved from the list of active requests (*ActiveRequests*) to the list of pending requests (*PendingRequests*). E_r denotes the estimated number of steps to return to the original state that was used in the cost function. In addition, we assume that $State_r^k$ denotes the FSMC's state of the MS with request r at frame k . If the state was changed and the cost function is less than one, the algorithm records TS_r and E_r as defined above and moves the request to *PendingRequests*. For each request in *PendingRequests*, the algorithm compares the current state with the state before the change. If the MS returns to its original state, the request is moved back to *ActiveRequests*. Otherwise, if the MS is not in its original state for more than the predicted number of steps, the request is moved to the new requests list *NewRequests*. We note that the operation defined above is done for all requests independent of their period; hence we ignore the period of the lists, which is later used by the MOA. The complexity of the EMOA Mapper algorithm remains the same as for the MOA and SPM algorithm, that is, $O(n^2)$.

Numerical Results — Dynamic Case

System model

In order to study the performance of the suggested algorithms, we used a system-level simulator, which complies with the baseline configuration and simulation assumptions in the IEEE 802.16m evaluation methodology [6]. We used a single cell environment with a cell radius of 1.5 km. The major parameters are defined in tab. 1.

The MSs are uniformly dropped within the cell and we use random interval mobility model with cell wrap-around. We define two normalized offered load models per MS: one with a medium load of $a = 0.5$ Erlang and another with a high load of $a = 0.9$ Erlang.

This load model defines the average percentage of registered MSs that are in active session at each frame. Each MS, when finishing its current session, will choose the start time of its next session based on an exponential distribution with mean of $\lambda = Na/T$, where N is the number of registered MSs and T is the average call duration. We use this load model rather than just increasing the number of registered MSs with always-on sessions, since we want to simulate the dynamic behavior of entering or leaving requests, rather than just requests that transit between active and idle states.

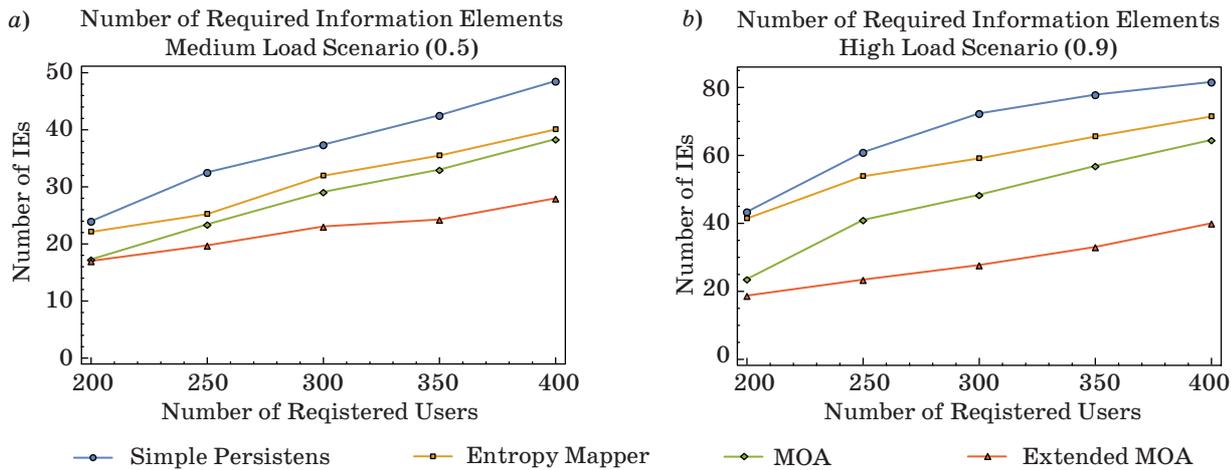
■ **Table 1.** System parameters used for the evaluation of VoIP persistent allocation algorithms

Parameter	Value
FFT Size	1024
CP	1/8
Operating Bandwidth	10 MHz
Duplexing scheme	TDD
Subchannelization	PUSC
Coding	Convolutional Turbo Coding (CTC)
Cell Radius	1.5 km
BS Antenna Height	32 m
MS Antenna Height	1.5 m
Carrier Frequency	2.5 GHz
BS TX Power	42 dBm
Number of BSs	1
Number of MSs	25–400
Path Loss Model	$PL(\text{dB}) = 130.18 + 37.6 \log(R_{km})$
Lognormal Shadowing Standard Deviation	8 dB
Mobility	0–120 km/h
Channel Mix (ITU)	Static — 12 % Pedestrian B (3 km/h) — 56 % Vehicular A-1 (30 km/h) — 16 % Vehicular A-2 (120 km/h) — 16 %

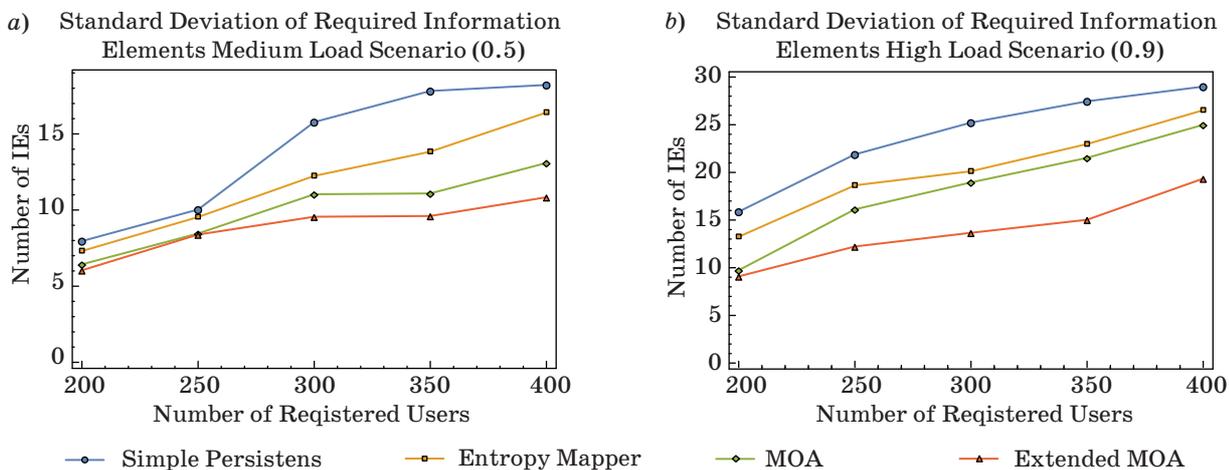
■ **Table 2.** AMR 12.2 Codec parameters

Parameter	Value
AMR Codec Frame Length	20 ms
Voice Payload with RTP and 802.16 overhead	44 Bytes
Inactive Payload (with same overhead as voice)	18 Bytes
Average Call Time	$\sim \text{Exp}(\mu)$, $1/\mu = 210$ s
Talk Spurt length	$\sim \text{Exp}(\mu)$, $1/\mu = 1026$ ms
Silence length	$\sim \text{Exp}(\mu)$, $1/\mu = 1171$ ms

We consider a VoIP model, that contains periods of active talking spurts (ON periods) interleaved by silence periods (or OFF periods). Specifically, we consider the AMR codec [5], which is optimized for speech coding and was adopted as the standard speech codec by the 3GPP standardization group, widely used in GSM and is recommended for system evaluation of WiMAX systems [6]. Tab. 2 describes the parameters for the RTP AMR 12.2 codec with a voice activity factor of ~50 %.



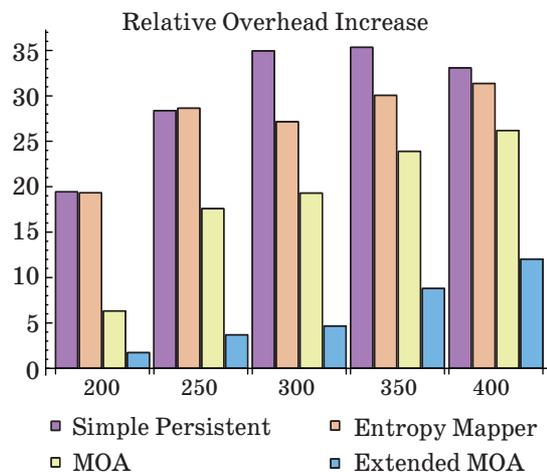
■ Fig. 3. Comparison of overhead between the VoIP mapping algorithms for a load of 0.5 (a) and 0.9 (b) Erlang



■ Fig. 4. Comparison of standard deviation between the VoIP mapping algorithms for a load of 0.5 (a) and 0.9 (b) Erlang

Discussion

Figures 3, a and b depict the average number of IEs included in the UL-MAP of the algorithms defined for the dynamic case. Compared to the static case, here we can see that there is more overhead, since the operational state of the MSs change more frequently. We can also see that the extended MOA provides considerable performance gain compared to the other algorithms in all load scenarios. In addition, the entropy mapper algorithm, which organizes the requests according to their channel dynamics and uses the simple persistent algorithm, provides a considerable overhead decrease compared to the simple persistent mapper. This is due to the fact that when all the dynamic MSs are grouped together, the probability of consecutive holes increases, and hence, these holes are easier to fill or require less resource shifting operations for removing them. In addition, we can observe that



■ Fig. 5. Relative overhead increase between medium and high loads for the proposed algorithms as function of system load

when the system dynamics increases (the high load scenario in Fig. 3, *b*), the performance differences between the algorithms increase. Figures 4, *a* and *b* depict the standard deviation of the UL-MAP IEs per scenario and algorithm. It can be seen that the variation coefficient for all the algorithms is between 30 to ~55 %. Also, the algorithms maintain the relative order of performance with the standard deviation of the overhead. Finally, Fig. 5, shows the relative overhead increase between the medium load and high load scenarios as a function of the number of registered MSs. It can be observed that the extended MOA has the lowest sensitivity factor to load increase, which enables it to maintain low load overhead compared to the other algorithms.

Conclusions

This paper discusses the mapping overhead problem in IEEE 802.16 OFDMA-based systems. This problem needs to be solved for practical systems such that the advantages of the OFDMA technology can be applied in future broadband wireless communication systems, both fixed and mobile. We are using the notion of semi-fixed allocations (which is similar to the persistent allocation) that enables the BS to discard IEs from the UL-MAP, thus reducing mapping overhead. Since the problem of reducing the mapping overhead is NP hard, as already was shown in [2], our effort was directed at developing efficient heuristic solutions. We extend the fixed model of [2] to support the dynamic case with a mixture of mobility models and VoIP codec with silent suppression. The dynamic case is mainly characterized by frequent MCS changes due to changes in channel states during the VoIP call. The efficiency

of the algorithm may be enhanced when deciding not to change the allocation for a short change in channel conditions. In order to achieve this goal, we provided channel tracking and prediction model by employing the FSMC model and simple approximations of state probability and state transition probability. Two algorithms that extend the VoIP mapping for the dynamic case were presented and their performance gain compared to a simple persistent allocation approach was shown.

The main advantage of the proposed algorithms is their ability to support multiple codecs, or a single codec with different operational modes, that results in different packet sizes and different periods. In addition, our proposed algorithms cluster the assignments together hence enabling the BS to allocate unused resources to other traffic types. Our main contribution in this paper is to develop explicit mapping algorithms that efficiently reduce the mapping overhead of VoIP data usage. Our solutions present a cross-layer oriented approach, which track the channel state in order to predict the expected cost of channel change on the overall system cost. One of the main observations is that in some cases, the BS should under-react to changes in channel conditions since it is more rewarding from a system-wise perspective. The proposed algorithms conform to the mechanism of persistent allocation as defined in the IEEE 802.16 standard.

Our proposed algorithms were applied to UL-MAP only. Specific adaptation of the algorithms is required for adjusting them to support DL allocations. In addition, the proposed algorithms are not necessary limited to IEEE 802.16 based technologies, and future research is adopting them to LTE based systems.

References

1. Ben-Shimol Y., and Kitroser I. An Efficient Cross-Layer Aware Mapping of VoIP Calls in Wireless OFDMA Systems. Part I: Problem description and channel tracking. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2015, no. 2(75), pp. 90–97. doi:10.15217/issn1684-8853.2015.2.90
2. Kitroser I., Chai E., and Ben-Shimol Y. Efficient Mapping of Multiple VoIP Vocoders in WiMAX Systems. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2009, vol. 11, no. 6, pp. 667–678.
3. 802.16-2009 IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks. Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems. IEEE 802.16-2009, May 2009.
4. IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks. Part 16: Air Interface for Broadband Wireless Access Systems. Amendment 3: Advanced Air Interface. IEEE 802.16m-2011, May 2011.
5. Mandatory Speech Codec Speech Processing Functions; Adaptive Multi-Rate (AMR) Speech Codec; Transcoding Functions, 3GPP TS 26.090V10.0.0, March 2011.
6. Draft IEEE 802.16m Evaluation Methodology, IEEE 802.16m-07/037r2, December 2007.

СИСТЕМА СВЯЗИ, ОСНОВАННАЯ НА СИНХРОНИЗАЦИИ СИСТЕМ С ЗАДЕРЖКОЙ С ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕМ ХАОТИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ

Д. Д. Кульминский^а, младший научный сотрудник
 В. И. Пономаренко^а, доктор физ.-мат. наук, доцент
 А. С. Караваяев^б, канд. физ.-мат. наук, доцент
 М. Д. Прохоров^а, доктор физ.-мат. наук, доцент

^аСаратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Саратов, РФ

^бСаратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского, Саратов, РФ

Введение: многие системы передачи информации, основанные на явлении хаотической синхронизации, имеют низкую устойчивость к шумам и искажениям сигнала в канале связи, ограничивающую их практическое применение. **Цель:** разработка и исследование схемы передачи информации с переключением хаотических режимов, обладающей высокой устойчивостью к шумам и амплитудным искажениям сигнала в канале связи. **Результаты:** предложена модификация классической схемы связи с переключением хаотических режимов, существенно увеличивающая помехоустойчивость системы. Передатчик и приемник схемы построены на основе систем с запаздывающей обратной связью, демонстрирующих хаотическую динамику высокой размерности. Проведены численные исследования предложенной системы передачи информации. Построены зависимости вероятности ошибки на бит при передаче бинарного информационного сигнала от отношения сигнал/шум, затухания сигнала в канале связи и длины интервала времени, в течение которого передается один бит. Показано, что предложенная система связи демонстрирует значительно более высокую устойчивость к шумам и амплитудным искажениям сигнала в канале связи, чем большинство других систем передачи информации, использующих хаотическую синхронизацию для передачи информационного сигнала через аналоговый канал связи. **Практическая значимость:** предложенная система связи позволяет повысить устойчивость схем с переключением хаотических режимов к шумам и затуханию сигнала в канале связи, что открывает возможность их практического использования.

Ключевые слова — система передачи информации, хаотическая синхронизация, системы с запаздыванием.

Введение

В отличие от явления синхронизации периодических осцилляторов, впервые описанного Гюйгенсом еще в XVII в., синхронизация хаотических колебаний долгое время считалась невозможной из-за высокой чувствительности хаотических систем к начальным условиям. Лишь в 1990 г. Пекора и Кэрролл доказали теоретически, численно и экспериментально, что состояния двух однонаправленно связанных хаотических систем могут быть синхронизованы [1]. Эта работа стимулировала интерес к исследованию хаотической синхронизации и разработке информационно-коммуникационных систем на основе динамического хаоса. Было предложено много различных способов кодирования, передачи и извлечения информационного сигнала, использующих синхронизацию хаотических систем приемника и передатчика. Наиболее популярными из них являются хаотическая маскировка [2, 3], переключение хаотических режимов [4, 5], хаотическая модуляция [6] и нелинейное подмешивание информационного сигнала к хаотическому [7]. Перечисленные способы легли в основу разработки многочисленных систем связи с хаотической несущей [8–19].

Хаотические системы передачи информации привлекают к себе большой интерес благодаря,

в первую очередь, таким потенциальным достоинствам, как высокая скорость и конфиденциальность передаваемого сообщения. Вместе с тем системы связи, основанные на явлении хаотической синхронизации, не лишены серьезных недостатков, которые ограничивают их практическое применение. Основным недостатком таких систем является резкое ухудшение качества выделяемого в приемнике информационного сигнала при расстройке параметров передатчика и приемника и при увеличении шума и искажений сигнала в канале связи.

В нашей недавней работе [17] была разработана экспериментальная цифровая система связи с нелинейным подмешиванием информационного сигнала к хаотическому, в которой приемник и передатчик были реализованы на программируемых микроконтроллерах. Это позволило обеспечить идентичность параметров схемы и повысить ее помехоустойчивость. Была построена [19] устойчивая к шумам экспериментальная система связи с переключением хаотических режимов и аналоговым каналом передачи информации. В настоящей работе мы провели численные исследования экспериментально разработанной [19] системы передачи информации, которые позволили выявить технические недостатки экспериментальной установки и наметить пути их устранения.

Схема передачи информации

Блок-схема предложенной системы связи с переключением хаотических режимов представлена на рис. 1. Передатчик и приемник схемы построены на основе систем с запаздывающей обратной связью. Такие системы могут демонстрировать хаотическую динамику высокой размерности, что потенциально может повысить уровень защиты передаваемой информации [9, 15–17].

В передатчике реализована кольцевая система, генерирующая хаотический сигнал. Она включает в себя две линии задержки со временами запаздывания τ_1 и τ_2 , нелинейный элемент и линейный фильтр низких частот. Бинарный информационный сигнал $m(t)$ управляет ключом, положение которого определяет величину времени запаздывания в системе. Если передается логический 0, то передатчик имеет время задержки, равное τ_1 . Если же передается логическая 1, то передатчик имеет время задержки $\tau_1 + \tau_2$. Динамика реализованной в передатчике системы с запаздыванием описывается дифференциальным уравнением с запаздывающим аргументом:

$$\varepsilon \dot{x}(t) = -x(t) + f(x(t - (\tau_1 + m(t)\tau_2))), \quad (1)$$

где ε — параметр инерционности; $x(t)$ — динамическая переменная; f — нелинейная функция. Для обеспечения скрытности передаваемого информационного сигнала хаотическая несущая передатчика должна обладать близкими статистическими и спектральными характеристиками при τ_1 и $\tau_1 + \tau_2$.

В приемнике реализованы две ведомые системы с запаздыванием, одна из которых имеет линию задержки со временем запаздывания τ_1 , а вторая — со временем запаздывания $\tau_3 = \tau_1 + \tau_2$. Остальные элементы ведомых систем идентичны соответствующим элементам передатчика. Обе системы приемника содержат вычитатель, разрывающий цепь обратной связи. Эти ведомые системы описываются следующими уравнениями:

$$\varepsilon \dot{y}(t) = -y(t) + f(x(t - \tau_1)); \quad (2)$$

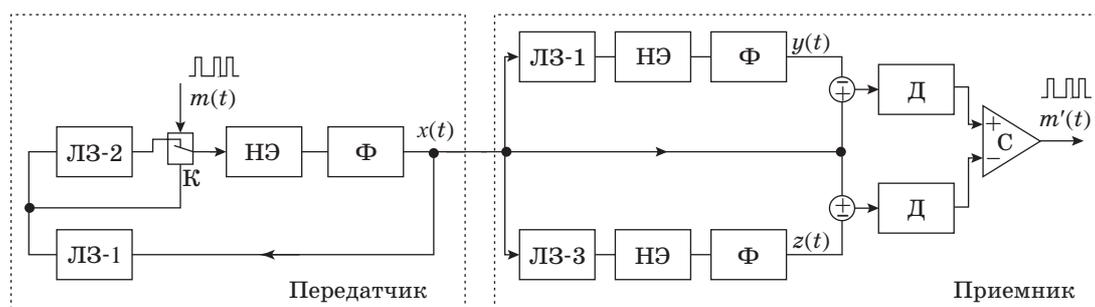
$$\varepsilon \dot{z}(t) = -z(t) + f(x(t - \tau_3)). \quad (3)$$

Для работоспособности схемы необходимо соответствующим образом задать ее параметры, обеспечив в каждый момент времени существование синхронизации между передатчиком и лишь одной из систем приемника. При передаче логического 0 сигнал $y(t)$ первой системы приемника синхронизируется в отсутствие шума с сигналом $x(t)$. В этом случае $x(t) = y(t)$, и на выходе вычитателя этой ведомой системы имеем нулевой сигнал. При этом на выходе вычитателя второй системы приемника имеем отличный от нуля сигнал, так как $x(t)$ и $z(t)$ не синхронизованы. При передаче логической 1 $x(t) = z(t)$, но $x(t) \neq y(t)$. Поэтому на выходе первой системы приемника сигнал отличен от нуля, а на выходе второй равен нулю.

Описанная выше идея лежит в основе работы классических схем передачи информации с переключением хаотических режимов. Недостатком этих схем является их низкая устойчивость к шуму в канале связи. Наличие шума мешает возникновению синхронизации между передатчиком и приемником, приводя к тому, что сигнал на выходе вычитателей и первой, и второй ведомой системы всегда отличен от нуля. Это затрудняет определение того, какой из логических символов (0 или 1) передается.

Для увеличения помехоустойчивости схемы мы модифицировали ее, руководствуясь следующими соображениями. В присутствии шума в канале связи сигнал на выходе вычитателя синхронизованной ведомой системы приемника имеет дисперсию, величина которой сравнима с дисперсией этого шума. При этом сигнал на выходе вычитателя несинхронизованной ведомой системы имеет дисперсию, сравнимую с дисперсией хаотического сигнала.

Учитывая тот факт, что уровень шума канала связи, как правило, намного меньше уровня хаотического сигнала, можно точно восстановить скрытое сообщение даже при достаточно высоком уровне шума. Для этого мы модифицировали классическую схему с переключением хаотических режимов, добавив в приемник два детектора и компаратор (см. рис. 1). Детекторы оценивают



■ Рис. 1. Блок-схема системы передачи информации: ЛЗ-1, ЛЗ-2, ЛЗ-3 — линии задержки; К — ключ; НЭ — нелинейный элемент; Ф — фильтр; Д — детектор; С — компаратор

дисперсию сигнала, поступающего с выхода вычитателя, а компаратор находит разность $r(t)$ поступающих на него сигналов. На выходе компаратора имеем выделенный информационный сигнал $m'(t)$, который равен логическому 0 при $r(t) \leq 0$ и логической 1 при $r(t) > 0$. Отметим, что представленная на рис. 1 схема отличается и от схемы, предложенной нами [16], в которой приемник дополнительно содержал амплитудные детекторы, дифференциальный усилитель и фильтр. Как показали проведенные исследования, схема на рис. 1 оказывается более устойчивой к шуму и ее проще реализовать в радиофизическом эксперименте.

Рассмотренная система передачи информации на основе генератора с запаздывающей обратной связью с переключением хаотических режимов была реализована в радиофизическом эксперименте [19]. Для обеспечения полной идентичности параметров передатчика и приемника все элементы схемы были реализованы в цифровом виде. Использование в качестве генератора хаоса системы с запаздыванием первого порядка позволило реализовать систему передачи на базе простых 8-битных микроконтроллеров семейства Atmel mega AVR. Экспериментальное исследование системы показало, что она имеет более высокую устойчивость к шумам и амплитудным искажениям сигнала в канале связи, чем большинство других систем передачи информации, использующих хаотическую синхронизацию для передачи скрытого сообщения через аналоговый канал связи [8, 12]. Однако численных исследований предложенной системы связи проведено не было.

Численное исследование системы передачи информации

В настоящей работе мы впервые провели численные исследования системы передачи информации, представленной на рис. 1, и изучили ее потенциальные возможности и границы применимости.

В качестве передатчика возьмем генератор с запаздывающей обратной связью, имеющий квадратичную нелинейность $f(x) = \lambda - x^2$, где λ — параметр нелинейности, и фильтр низких частот в виде фильтра Баттерворта первого порядка с частотой среза $f_c = 1/\varepsilon$. Такой передатчик описывается уравнением

$$\varepsilon \dot{x}(t) = -x(t) + \lambda - (x(t - (\tau_1 + m(t)\tau_2)))^2. \quad (4)$$

Уравнения ведомых систем приемника имеют следующий вид:

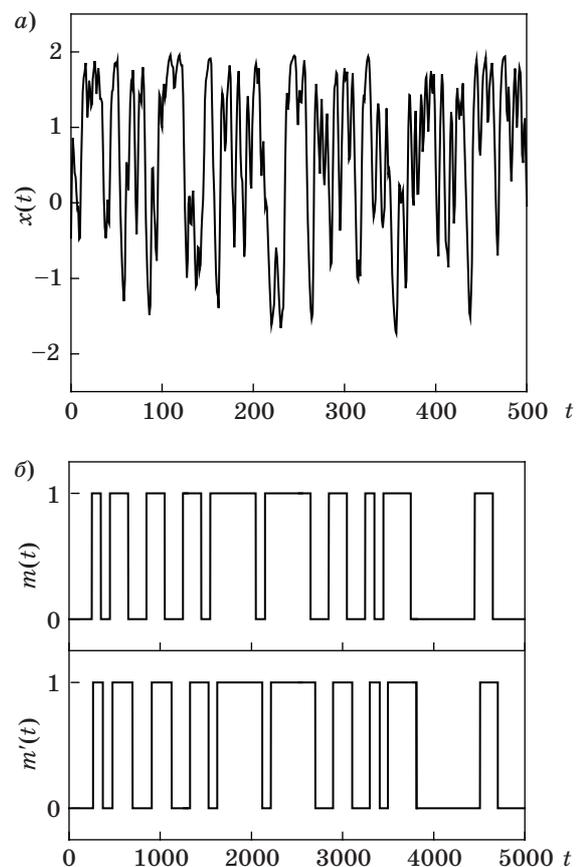
$$\varepsilon \dot{y}(t) = -y(t) + \lambda - (x(t - \tau_1))^2; \quad (5)$$

$$\varepsilon \dot{z}(t) = -z(t) + \lambda - (x(t - \tau_3))^2. \quad (6)$$

Зададим такие значения параметров передатчика: $\tau_1 = 100$, $\tau_2 = 10$, $\tau_3 = 110$, $\lambda = 1,9$, $f_c = 0,5$ ($\varepsilon = 2$), — при которых он демонстрирует хаотическую динамику. На рис. 2, а представлен фрагмент временной реализации хаотического сигнала $x(t)$ на выходе передатчика. При близких значениях τ_1 и $\tau_1 + \tau_2$ временные реализации сигнала $x(t)$ практически неразличимы. Поэтому стороннему наблюдателю сложно определить сам факт передачи информационного сигнала.

Временная реализация передаваемого бинарного сигнала $m(t)$ показана на рис. 2, б. Каждый бит информационного сигнала $m(t)$ передается в течение интервала времени $l = 100$. Этот же интервал времени используется для оценки дисперсии сигналов, поступающих на вход детекторов. Восстановленный информационный сигнал $m'(t)$ на выходе приемника также показан на рис. 2, б. Видно, что информационный сигнал восстанавливается точно, но с некоторой задержкой, величина которой зависит от параметров детекторов.

Для моделирования шума в канале связи к временному ряду хаотического сигнала передатчика $x(t)$ добавлялся гауссов шум с нулевым средним,



■ Рис. 2. Фрагменты временных реализаций хаотического сигнала $x(t)$ (а) и информационных сигналов $m(t)$ и $m'(t)$ (б)

отфильтрованный в полосе частот хаотической несущей. Для различных уровней шума в приемнике был восстановлен бинарный информационный сигнал $m'(t)$. Затем мы построили графики, иллюстрирующие вероятность ошибки на бит (BER) при передаче бинарного сигнала при различных отношениях сигнал/шум (SNR), понимая под сигналом сигнал $x(t)$.

Зависимости BER от SNR для различных значений l построены на рис. 3, а. На этом и последующих графиках величина BER рассчитывалась при передаче случайной последовательности, содержащей 10^5 логических символов 0 и 1. При $l = 100$ и $l = 200$ сигнал сообщения выделялся без ошибок при $\text{SNR} \geq 12$ дБ и $\text{SNR} \geq 10$ дБ соответственно. То есть предложенная система связи демонстрирует значительно более высокую помехоустойчивость, чем остальные системы передачи информации, использующие хаотическую синхронизацию для передачи сигнала сообщения [8, 12].

В реальном канале связи всегда происходит затухание сигнала, которое может оказаться критичным для работы схемы передачи информации. Действительно, многие системы связи, особенно хаотические системы с нелинейным подмешиванием и системы с переключением хаотических режимов, имеют низкую устойчивость к искажениям сигнала в канале связи. Для исследования устойчивости предложенной схемы к амплитудным искажениям сигнала мы меняли затухание сигнала в канале связи.

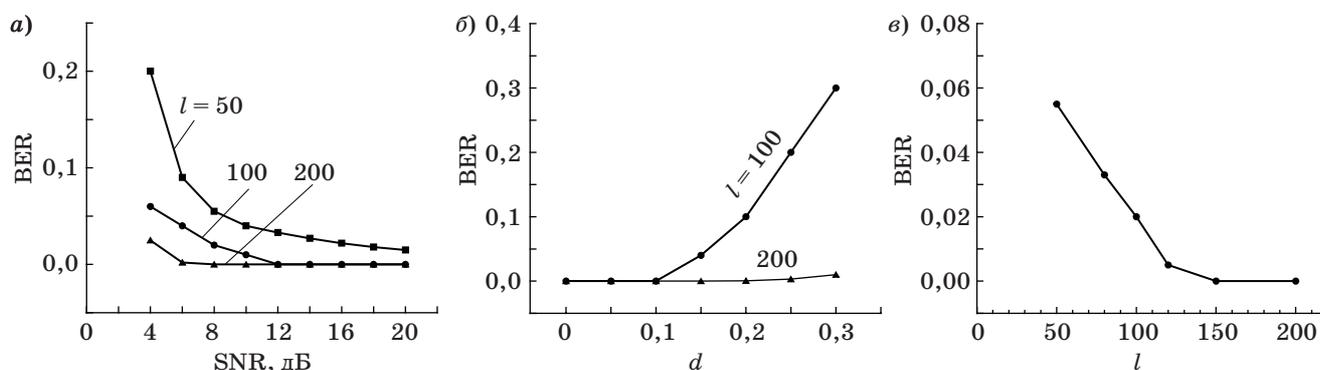
Построены (рис. 3, б) зависимости BER от параметра $d = (A_t - A_r)/A_t$, где A_t и A_r — амплитуды сигналов на выходе передатчика и входе приемника соответственно. При $l = 100$ и $l = 200$ бинарный информационный сигнал на выходе приемника выделялся без ошибок при $d \leq 0,1$ и $d \leq 0,15$ соответственно. Значение $d = 0,1$ соответствует затуханию сигнала примерно на 1 дБ. При таком уровне затухания сигнала в канале связи другие схемы с переключением хаотических режимов

и схемы с нелинейным подмешиванием оказываются неработоспособными [12].

Исследуемая система передачи информации имеет определенные ограничения на скорость передачи сигнала сообщения. Это ограничение обусловлено переходными процессами, вызываемыми изменением параметров системы под действием информационного сигнала, и присущее всем системам связи с переключением хаотических режимов. После скачкообразного изменения времени запаздывания передающей системы возникает переходный процесс, лишь после окончания которого одна из ведомых систем приемника синхронизируется с передатчиком. Для повышения скорости передачи информации необходимо уменьшить характерные временные масштабы хаотической системы или уменьшить длину временного интервала, в течение которого передается каждый бит. Однако в последнем случае это может привести к увеличению BER при выделении информационного сигнала в приемнике.

Зависимость BER от длины l интервала времени, в течение которого передается один бит (рис. 3, в), построена при $\text{SNR} = 8$ дБ и $d = 0$. В области малых значений l с уменьшением l наблюдается рост BER. С другой стороны, при высоких уровнях шума в канале связи можно улучшить качество восстановления информационного сигнала, увеличив величину l , что приведет к уменьшению BER.

Сравнение представленных результатов численного исследования системы передачи информации с результатами исследования экспериментальной схемы [19] показывает, что при численном моделировании исследуемая система связи демонстрирует существенно более высокую устойчивость к шуму и затуханию сигнала, чем в радиофизическом эксперименте. В экспериментальной схеме величина BER при высоких уровнях шума была на порядок выше, а при большом затухании сигнала в разы выше, чем при численном моделировании.



■ Рис. 3. Зависимости вероятности ошибки на бит: а — от отношения сигнал/шум; б — от затухания сигнала в канале связи; в — от длины интервала времени, в течение которого передается один бит

Мы провели исследование причин столь существенной разницы характеристик BER в модельной и экспериментальной системах и установили, что основной причиной увеличения BER в экспериментальной установке является наличие постоянного смещения сигнала в канале связи. Это смещение снижало устойчивость схемы к шумам и приводило к существенному ухудшению качества приема информационного сигнала. Таким образом, результаты численного моделирования системы связи показали, что возможности построенной нами ранее экспериментальной схемы далеко не исчерпаны, и можно существенно улучшить ее помехоустойчивость, введя подстройку постоянного смещения сигнала в канале связи.

Заключение

Проведены численные исследования оригинальной системы передачи информации, основанной на переключении хаотических режимов в генераторе с запаздывающей обратной связью. Показано, что предложенная модификация при-

емника позволяет повысить устойчивость схемы к шумам и затуханию сигнала в канале связи.

Эффективность исследованной системы связи продемонстрирована при передаче бинарного информационного сигнала. Построены зависимости вероятности ошибки на бит от отношения сигнал/шум, затухания сигнала в канале связи и длины интервала времени, в течение которого передается один бит. Обсуждены возможности увеличения скорости передачи информационного сигнала.

Сравнение результатов численного моделирования исследуемой системы связи с результатами ранее проведенного исследования экспериментальной схемы свидетельствует о том, что эффективность предложенной схемы передачи информации может быть существенно улучшена в радиофизическом эксперименте. В частности, вероятность ошибки на бит при передаче бинарного информационного сигнала при высоких уровнях шума может быть уменьшена в несколько раз.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 13-02-00227, и гранта президента РФ, НШ-1726.2014.2.

Литература

1. Pecora L. M., Carroll T. L. Synchronization in Chaotic Systems // *Physical Review Letters*. 1990. Vol. 64. P. 821–824. doi:10.1103/PhysRevLett.64.821
2. Kocarev L., et al. Experimental Demonstration of Secure Communications via Chaotic Synchronization // *International Journal of Bifurcation and Chaos*. 1992. Vol. 2. P. 709–713. doi:10.1142/S0218127492000823
3. Cuomo K. M., Oppenheim A. V. Circuit Implementation of Synchronized Chaos with Applications to Communications // *Physical Review Letters*. 1993. Vol. 71. P. 65–68. doi:10.1103/PhysRevLett.71.65
4. Parlitz U., et al. Transmission of Digital Signals by Chaotic Synchronization // *International Journal of Bifurcation and Chaos*. 1992. Vol. 2. P. 973–977. doi:10.1142/S0218127492000562
5. Dedieu H., Kennedy M. P., Hasler M. Chaos Shift Keying: Modulation and Demodulation of a Chaotic Carrier Using Self-Synchronizing Chua's Circuits // *IEEE Transactions on Circuits and Systems II*. 1993. Vol. 40. P. 634–642. doi:10.1109/82.246164
6. Halle K. S., Wu C. W., Itoh M., Chua L. O. Spread Spectrum Communication through Modulation of Chaos // *International Journal of Bifurcation and Chaos*. 1993. Vol. 3. P. 469–477. doi:10.1142/S0218127493000374
7. Волковский А. Р., Рудков Н. Ф. Синхронный хаотический отклик нелинейной системы передачи информации с хаотической несущей // *Письма в Журнал технической физики*. 1993. Т. 19. Вып. 3. С. 71–75.
8. Дмитриев А. С., Панас А. И. Динамический хаос: новые носители информации для систем связи. — М.: Физматлит, 2002. — 252 с.
9. Пономаренко В. И., Прохоров М. Д. Кодирование и извлечение информации, замаскированной хаотическим сигналом системы с запаздыванием // *Радиотехника и электроника*. 2004. Т. 49. № 9. С. 1098–1104.
10. Tao Y. A Survey of Chaotic Secure Communication Systems // *International Journal of Computational Cognition*. 2004. Vol. 2. P. 81–130. doi:10.1.1.14.9724
11. Argyris A., et al. Chaos-based Communications at High Bit Rates Using Commercial Fibre-optic Links // *Nature*. 2005. Vol. 437. P. 343–346. doi:10.1038/nature04275
12. Короновский А. А., Москаленко О. И., Храмов А. Е. О применении хаотической синхронизации для скрытой передачи информации // *Успехи физических наук*. 2009. Т. 179. С. 1281–1310. doi:10.3367/UFN.0179.200912c.1281
13. Короновский А. А., Москаленко О. И., Храмов А. Е. Скрытая передача информации на основе режима обобщенной синхронизации в присутствии шумов // *Журнал технической физики*. 2010. Т. 80. Вып. 4. С. 1–8.
14. Wang M.-J., Wang X.-Y., Pei B.-N. A New Digital Communication Scheme Based on Chaotic Modulation // *Nonlinear Dynamics*. 2012. Vol. 67. P. 1097–1104. doi:10.1007/s11071-011-0053-z
15. Kye W.-H. Information Transfer via Implicit Encoding with Delay Time Modulation in a Time-Delay System // *Physics Letters A*. 2012. Vol. 376. P. 2663–2667. doi:10.1016/j.physleta.2012.07.015

16. Пономаренко В. И., Караваев А. С., Глуховская Е. Е., Прохоров М. Д. Система скрытой передачи информации на основе системы с запаздыванием с переключаемым временем задержки // Письма в Журнал технической физики. 2012. Т. 38. Вып. 1. С. 103–110.
17. Караваев А. С., Кульминский Д. Д., Пономаренко В. И., Прохоров М. Д. Система цифровой передачи информации, маскируемой хаотическим сигналом системы с запаздыванием // Информационно-управляющие системы. 2013. № 4. С. 30–35.
18. Abderrahim N. W., Benmansour F. Z., Seddiki O. A Chaotic Stream Cipher Based on Symbolic Dynamic Description and Synchronization // *Nonlinear Dynamics*. 2014. Vol. 78. P. 197–207. doi:10.1007/s11071-014-1432-z
19. Караваев А. С., Кульминский Д. Д., Пономаренко В. И., Прохоров М. Д. Экспериментальная система скрытой передачи информации на генераторе с запаздывающей обратной связью с переключением хаотических режимов // Письма в Журнал технической физики. 2015. Т. 41. Вып. 1. С. 3–11.

UDC 537.86

doi:10.15217/issn1684-8853.2015.3.85

Communication System Based on Synchronization of Time-Delay Systems with Switching of Chaotic RegimesKul'minskii D. D.^a, Junior Researcher, kulminskydd@gmail.comPonomarenko V. I.^a, Dr. Sc., Phys.-Math., Associate Professor, ponomarenkovi@gmail.comKaravaev A. S.^b, PhD, Phys.-Math., Associate Professor, karavaevas@gmail.comProkhorov M. D.^a, Dr. Sc., Phys.-Math., Associate Professor, mdprokhorov@yandex.ru^aSaratov Branch of Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of RAS, 38, Zelyonaya St., 410019, Saratov, Russian Federation^bSaratov State University, 83, Astrakhanskaya St., 410012, Saratov, Russian Federation

Introduction: Many communication systems based on chaotic synchronization have a low interference immunity and low resistance to signal distortion in the communication channel, which restricts their use in practice. **Purpose:** The development and investigation of a communication scheme with switching of chaotic regimes, which would have a high resistance to noise and amplitude distortions of the signal in the communication channel. **Results:** A modification of the classic data transmission scheme with switching of chaotic regimes is proposed, which significantly increases the noise tolerance of the system. The transmitter and receiver are constructed on the base of time-delayed feedback oscillators, which exhibit high-dimensional chaotic dynamics. The proposed communication scheme has been studied numerically. The dependencies of bit-error rate of the recovered binary message on the signal-to-noise ratio, on the signal attenuation in the communication channel and on the bit transmission duration have been studied. It is shown that the proposed communication system has a significantly higher resistance to noise and amplitude distortions of the signal in the communication channel than most other communication schemes using chaotic synchronization for the transmission of information signals through an analog communication channel. **Practical relevance:** The proposed system of information transmission allows you to increase the tolerance to noise and signal attenuation in the communication channel of a scheme based on switching of chaotic regimes. This result opens a possibility for their use in practice.

Keywords — Communication System, Chaotic Synchronization, Time-Delay Systems.**References**

- Pecora L. M., Carroll T. L. Synchronization in Chaotic Systems. *Physical Review Letters*, 1990, vol. 64, pp. 821–824. doi:10.1103/PhysRevLett.64.821
- Kocarev L., Halle K. S., Eckert K., Chua L. O., Parlitz U. Experimental Demonstration of Secure Communications via Chaotic Synchronization. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 1992, vol. 2, pp. 709–713. doi:10.1142/S0218127492000823
- Cuomo K. M., Oppenheim A. V. Circuit Implementation of Synchronized Chaos with Applications to Communications. *Physical Review Letters*, 1993, vol. 71, pp. 65–68. doi:10.1103/PhysRevLett.71.65
- Parlitz U., Chua L. O., Kocarev L., Halle K. S., Shang A. Transmission of Digital Signals by Chaotic Synchronization. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 1992, vol. 2, pp. 973–977. doi:10.1142/S0218127492000562
- Dedieu H., Kennedy M. P., Hasler M. Chaos Shift Keying: Modulation and Demodulation of a Chaotic Carrier Using Self-Synchronizing Chua's Circuits. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II*, 1993, vol. 40, pp. 634–642. doi:10.1109/82.246164
- Halle K. S., Wu C. W., Itoh M., Chua L. O. Spread Spectrum Communication through Modulation of Chaos. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 1993, vol. 3, pp. 469–477. doi:10.1142/S0218127493000374
- Volkovskii A. R., Rul'kov N. F. Synchronous Chaotic Response of a Nonlinear Oscillator System as a Principle for the Detection of the Information Component of Chaos. *Pisma v Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*, 1993, vol. 19, pp. 97–99 (In Russian).
- Dmitriev A. S., Panas A. I. *Dinamicheskii khaos: novye nositeli informatsii dlia sistem svyazi* [Dynamical Chaos: New Information Carriers for Communication Systems]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2002. 252 p. (In Russian).
- Ponomarenko V. I., Prokhorov M. D. Coding and Recovery of Information Masked by the Chaotic Signal of a Time-Delay System. *Radiotekhnika i elektronika*, 2004, vol. 49, pp. 1031–1037 (In Russian).
- Tao Y. A Survey of Chaotic Secure Communication Systems. *International Journal of Computational Cognition*, 2004, vol. 2, pp. 81–130. doi:10.1.1.14.9724
- Argyris A., Syvridis D., Larger L., Annovazzi-Lodi V., Colet P., Fischer I., Garcia-Ojalvo J., Mirasso C. R., Pesquera L., Shore K. A. Chaos-Based Communications at High Bit Rates Using Commercial Fibre-Optic Links. *Nature*, 2005, vol. 437, pp. 343–346. doi:10.1038/nature04275
- Koronovskii A. A., Moskalenko O. I., Hramov A. E. On the Use of Chaotic Synchronization for Secure Communication. *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 2009, vol. 52, pp. 1213–1238. doi:10.3367/UFNe.0179.200912c.1281 (In Russian).

13. Koronovskii A. A., Moskalenko O. I., Hramov A. E. Hidden Data Transmission Using Generalized Synchronization in the Presence of Noise. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*, 2010, vol. 55, pp. 435–441. doi:10.1134/S1063784210040018 (In Russian).
14. Wang M.-J., Wang X.-Y., Pei B.-N. A New Digital Communication Scheme Based on Chaotic Modulation. *Nonlinear Dynamics*, 2012, vol. 67, pp. 1097–1104. doi:10.1007/s11071-011-0053-z
15. Kye W.-H. Information Transfer via Implicit Encoding with Delay Time Modulation in a Time-Delay System. *Physics Letters A*, 2012, vol. 376, pp. 2663–2667. doi:10.1016/j.physleta.2012.07.015
16. Ponomarenko V. I., Karavaev A. S., Glukhovskaya E. E., Prokhorov M. D. Hidden Data Transmission Based on Time-Delayed Feedback System with Switched Delay Time. *Pis'ma v Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*, 2012, vol. 38, pp. 51–54. doi:10.1134/S1063785012010129 (In Russian).
17. Karavaev A. S., Kulminskiy D. D., Ponomarenko V. I., Prokhorov M. D. System of Digital Transmission of Information Masked by Chaotic Signal of Time-Delay System. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2013, no. 4(65), pp. 30–35 (In Russian).
18. Abderrahim N. W., Benmansour F. Z., Seddiki O. A Chaotic Stream Cipher Based on Symbolic Dynamic Description and Synchronization. *Nonlinear Dynamics*, 2014, vol. 78, pp. 197–207. doi:10.1007/s11071-014-1432-z
19. Karavaev A. S., Kul'minskii D. D., Ponomarenko V. I., Prokhorov M. D. An Experimental System for Hidden Data Transmission Based on a Delayed-Feedback Generator with Switching of Chaotic Modes. *Pis'ma v Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*, 2015, vol. 41, pp. 1–4. doi:10.1134/S1063785015010083 (In Russian).

ПАМЯТКА ДЛЯ АВТОРОВ

Поступающие в редакцию статьи проходят обязательное рецензирование.

При наличии положительной рецензии статья рассматривается редакционной коллегией. Принятая в печать статья направляется автору для согласования редакторских правок. После согласования автор представляет в редакцию окончательный вариант текста статьи.

Процедуры согласования текста статьи могут осуществляться как непосредственно в редакции, так и по e-mail (ius.spb@gmail.com).

При отклонении статьи редакция представляет автору мотивированное заключение и рецензию, при необходимости доработать статью — рецензию. Рукописи не возвращаются.

Редакция журнала напоминает, что ответственность за достоверность и точность рекламных материалов несут рекламодатели.

СТРУКТУРНЫЙ СИНТЕЗ ЦЕНТРА СОПРЯЖЕНИЯ КОРПОРАТИВНЫХ СЕТЕЙ

Т. М. Татарникова^а, доктор техн. наук, доцент

^аСанкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,
Санкт-Петербург, РФ

Постановка проблемы: функции по объединению и согласованию разнородных сетей в составе корпоративной сети выполняются в центрах сопряжения разного уровня — мостах, коммутаторах, маршрутизаторах и шлюзах. Центры сопряжения создаются на базе процессоров с типичными архитектурами I386, PowerPC, ARM, RISC и др. Такая жесткая привязка архитектуры к функциональности не позволяет гибко управлять ресурсами и распределять нагрузку, а производительность центра сопряжения при выполнении фиксированных задач используется не полностью, а лишь на 10–20%. Альтернативой является динамическая настройка структуры центра сопряжения в зависимости от решаемых задач и внешних условий. Цель работы состоит в разработке методики синтеза центров сопряжения разнородных информационных сетей с заданным набором свойств. **Результаты:** предложена модель центра сопряжения корпоративных информационных сетей с выделением минимально полного набора структурных элементов, присущих всему многообразию вариантов центров сопряжения, что позволяет обеспечить универсальность данной модели в различных задачах синтеза структуры центра сопряжения. Разработана методика структурного синтеза центра сопряжения, которая отличается от существующих комбинированным применением этапов автоматической генерации множества альтернативных структур центра сопряжения на основе генетического алгоритма и «ручного» выбора предпочтительного варианта для осуществления многокритериального синтеза структуры центра сопряжения в условиях, близких к реальным. **Практическая значимость:** методика синтеза структуры центра сопряжения может найти применение при решении задач проектирования корпоративных информационных систем и выбора сетевого оборудования.

Ключевые слова — разнородные сети, корпоративная сеть, центр сопряжения, коммутатор, маршрутизатор, шлюз, структурный синтез, показатель качества, оптимизация структуры, генетический алгоритм.

Введение

Реализация корпоративной сети связана с проблемой организации эффективного взаимодействия отдельных разнородных частей распределенной сети [1]. Разнородность распространяется на многие показатели: скорость передачи данных, архитектуру, длину пакетов, топологию, программное обеспечение. Все функции по объединению и согласованию разнородных сетей выполняются в центрах сопряжения (ЦС) разного уровня и назначения: мостах, коммутаторах, маршрутизаторах и шлюзах, — обеспечивающих необходимое преобразование в терминах как аппаратуры, так и программного обеспечения [2, 3].

Центры сопряжения реализуются в виде многопроцессорных мультипрограммных систем с определенной конфигурацией. Выполняя основную функцию взаимодействия нескольких разнородных сетей, ЦС обрабатывают большие потоки информации, что приводит к необходимости распараллеливания во времени функций приема, передачи и обработки поступающих на их вход сообщений. Современные технологии построения ЦС основаны на идее динамической настройки их структуры в зависимости от решаемых задач и внешних условий, что позволяет повысить отдачу от уже сделанных инвестиций, оптимизировать и сократить затраты на приобретение нового оборудования [4].

Задачу структурного синтеза ЦС сформулируем как разработку методики выбора оптимальной конфигурации ЦС в зависимости от внешних условий с обеспечением необходимого качества обслуживания.

Постановка задачи исследования

Задача структурного синтеза ЦС сформулирована как смешанная многопараметрическая и многокритериальная экстремальная задача с ограничениями: при заданных технических характеристиках центра сопряжения найти такую его оптимальную структуру, чтобы выполнялись условия

$$0 < g_i(Q, H) \leq g_i^{\text{доп}}, g_i \in G, g_i^{\text{доп}} \in G^{\text{доп}}; \quad (1)$$

$$\varphi \rightarrow \min f(Q, H), \quad (2)$$

где H — множество структурно-функциональных модулей ЦС; Q — множество технических характеристик ЦС, $Q = \{q_i\}, i = \overline{1, V}$; G — множество показателей качества ЦС, $G = \{g_i\}, i = \overline{1, P}$; $G^{\text{доп}}$ — множество допустимых значений (ограничений) на показатели качества ЦС, $G^{\text{доп}} = \{g_i^{\text{доп}}\}, i = \overline{1, P}$;

φ — аддитивная функция стоимости ЦС.

Определим множества выражения (1).

Множество H — это базисный набор для структурного синтеза центров сопряжения, вклю-

чающий следующие функциональные модули (рис. 1):

— каналные модули $КМ$, предназначенные для выполнения процессов приема и передачи кадров; обозначим как множество $M1 = \{КМ_{i=1,S}\}$,

где S — число сопрягаемых неоднородных сетей;

— процессорный модуль $ПМ$, предназначенный для выполнения уровней протоколов ЦС. ПМ состоит из набора обрабатывающих модулей $ОМ$ — процессоров; обозначим как множество

$M2 = \{ОМ_{i=1,N;j=2,7}\}$, где N — число $ОМ$, реализующих протоколы j -го уровня эталонной модели взаимодействия открытых систем;

— модуль памяти — общее поле памяти $ОПП$, разбитое на секции для параллельного обслуживания нескольких $КМ$ и $ОМ$; обозначим как множество $M3 = \{ОПП_{i=1,M}\}$, где M — число секций общего поля памяти $СОПП$. Память хранит маршрутные и адресные таблицы, число мест для хранения пакетов, передаваемых от одного процесса к другому, или буферную память $БП$;

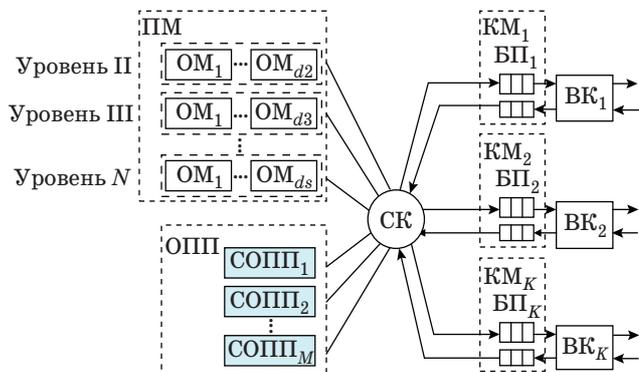
— схема комплексирования $СК$, предназначенная для объединения всех модулей в рамках одного ЦС; существует три $СК$: матрица коммутации — $СК1$, общая память — $СК2$, разделяемая шина — $СК3$;

— виртуальный канал $ВК$, предназначенный для отображения входа/выхода $КМ$ и поступающей на него нагрузки; обозначим как множество $M4$.

Множество G — показатели качества — это параметры, задающие технические характеристики структурно-функциональных модулей ЦС, и параметры, характеризующие определенное решение, принятое при выборе структуры ЦС.

Определены следующие показатели, характеризующие качество функционирования ЦС:

- пропускная способность ЦС — g_1 ;
- задержка передачи кадра — g_2 ;



■ Рис. 1. Структура центра сопряжения

— вероятность блокировки принимаемых кадров для входящего канала i (процент потерянных кадров) — g_3 .

К множеству параметров Q , задающих технические характеристики ЦС, отнесены:

— номинальное быстродействие обрабатывающих модулей — q_1 ;

— цикл обращения к памяти — q_2 ;

— объем памяти — q_3 ;

— длина машинного слова для обмена $ОМ$ с памятью — q_4 ;

— частота обращения $ОМ$ к памяти — q_5 .

В качестве оптимизируемых параметров H в зависимости от типа ЦС обоснованы и выбраны следующие:

— число $ОМ$ — N ;

— число $СОПП$ — M ;

— число $БП_{i=1,S}$, закрепленных за каждым входящим каналом;

— матрица распределения ресурсов по $СОПП$ — $RS_{i=1,R;j=1,M}$, где R — число общих ресурсов.

Процедура формирования оптимальной матрицы распределения общих информационных ресурсов по $СОПП$, учитывающая не объем ресурса, а число обращений к нему, приведена в работе [5].

Центр сопряжений структурируется из перечисленных готовых функциональных модулей в зависимости от нагрузки и степени неоднородности сопрягаемых сетей. С увеличением нагрузки возможно увеличение производительности ЦС расширением процессорного модуля по горизонтали путем добавления одного или нескольких $ОМ$ определенного уровня. При подключении новой сети активизируется новый $КМ$ и добавляются новые $ОМ$ по вертикали и $СОПП$, необходимое число которых определяется заранее для соблюдения требуемых показателей качества обслуживания. Переключением связей между модулями задается схема комплексирования [6].

Таким образом, структурная модель ЦС запишется в виде следующего кортежа элементов, характеристик и связей:

$$ЦС = \left\langle M1(q_1, q_4, q_5, S, БП_{i=1,S}), M2(q_1, q_5, N), M3(q_2, q_3, M, RS), M4, \bigcap_{i=1}^5 СК_i, G \right\rangle.$$

Частные варианты ЦС описываются следующими кортежами [7]:

— мост:

$$\left\langle M1(q_1, q_4, q_5, S = 2, БП_{i=1,2}), M4, СК2, G \right\rangle;$$

— коммутатор на базе матрицы:

$$\left\langle M1(q_1, q_4, q_5, S, \text{БП}_{i=\overline{1, S}}), M4, \text{СК1}, G \right\rangle;$$

— коммутатор на базе общей шины:

$$\left\langle M1(q_1, q_4, q_5, S, \text{БП}_{i=\overline{1, S}}), M4, \text{СК2}, G \right\rangle;$$

— коммутатор на базе общей памяти:

$$\left\langle \begin{array}{l} M1(q_1, q_4, q_5, S, \text{БП}_{i=\overline{1, S}}), \\ M3(q_2, q_3, M, RS), M4, \text{СК3}, G \end{array} \right\rangle;$$

— маршрутизатор/шлюз:

$$\left\langle \begin{array}{l} M1(q_1, q_4, q_5, S, \text{БП}_{i=\overline{1, S}}), M2(q_1, q_5, N), \\ M3(q_2, q_3, M, RS), \\ M4(\text{СК1} \vee \text{СК3}) \wedge (\text{СК2} \vee \text{СК3}), G \end{array} \right\rangle.$$

Таким образом, решение сформулированной задачи синтеза структуры ЦС распадается на два этапа. На первом этапе на соответствующих моделях находятся зависимости показателей качества. На втором этапе решается оптимизационная задача, определяемая выражениями (1), (2).

Оценка характеристик, определяющих качество ЦС, выполняется с применением аппарата теории массового обслуживания и подробно рассматривается в работах [8–11].

После определения характеристик ЦС решается задача формирования оптимальных конфигураций архитектуры ЦС, которую предлагается реализовать с привлечением разработанного генетического алгоритма (ГА).

Методика структурного синтеза ЦС

Методика структурного синтеза ЦС, основанная на ГА, носит итеративный характер, включает последовательность шагов, некоторые из которых автоматизированы, в частности параметрическая оптимизация, а часть из них связана с лицом, принимающим решение, например, при выборе вычислительных средств, по способу их комплексирования, о необходимости повторения оптимизации [12]. Предлагаемая методика является некоторой системой, поддерживающей принятие решения, и включает следующие шаги.

1. Определение значений внешних параметров на основе сетевых требований.

1.1. S — числа портов ЦС (взаимодействующих через ЦС сетей).

1.2. $v_i, i = \overline{1, S}$ — номинальной скорости передачи информации в канале связи [бит/с].

1.3. t_3^D — допустимой величины среднего времени задержки пакетов.

1.4. $P_{\text{и}}^D$ — допустимой вероятности искажения информации.

1.5. $P_{\text{бл}}^D$ — допустимой вероятности блокировки кадра.

2. Определение значений внешних параметров, отражающих информационные и алгоритмические свойства ЦС как элемента корпоративной сети.

2.1. L — средней длины пакета; L_{min} — минимального межкадрового интервала.

2.2. ρ — вектора коэффициентов использования входящих каналов.

2.3. q — вектора числа команд протокольных процессов.

2.4. π^P — матрицы суммарного числа команд, на которое протокольные процессы занимают информационные ресурсы.

2.5. E^P — матрицы суммарного числа обращений протокольных процессов к информационным ресурсам.

Большое количество названных внешних параметров объясняется сложностью реальных параллельных систем, при проектировании которых необходимо учитывать влияние мультипроцессорной реализации, сетевой операционной системы и протокольных процессов.

Значения параметров пп. 2.3–2.5 берутся из анализа реальных протоколов, который выполняется автоматически специальными программами мониторинга и анализаторами.

Если при структурном синтезе ЦС требуется провести расчеты по определению объемов секций памяти (в том случае, если объемы блоков памяти не были определены при выборе технических средств), дополнительно требуется определить следующие параметры.

2.6. L_{max} — максимальную длину пакета.

2.7. ℓ^P — вектор длин программных модулей протокольных процессов.

2.8. L^P — вектор длин элементов информационных ресурсов.

3. Уточнение структуры технических средств.

3.1. Выбрать типовой модуль для локальной памяти с циклом обращения τ^L и разрядностью слова Ψ бит, объем которого достаточен для хранения соответствующих уровней протоколов. Определить коэффициент стоимости $C^L(\tau^L, \Psi)$.

3.2. Выбрать тип процессора порта для $\text{КМ}_i, i = \overline{1, S}$, с номинальным быстродействием $\mathbf{B}_{\text{и}}^{\text{КМ}}$ и разрядностью слова Ψ_i .

Проверить условия

$$v_i \leq \frac{L_{\text{min}}}{L' \tau^E}, i = \overline{1, S} \quad (3)$$

и

$$\frac{\mathbf{B}_{\text{и}}^{\text{КМ}}}{\Psi_i} > \frac{1}{\tau^E}, i = \overline{1, S}, \quad (4)$$

где q_i^{Ψ} — число команд, выполняемых КМ_i , для записи (чтения) слова в (из) ОПП.

Определить коэффициент стоимости $C_i^{KM}(B_{ni}^{KM}, \Psi)$. Если (3), (4) не выполняются, то необходимо выбрать либо микропроцессор для КМ с большим быстродействием и повторить п. 3.2, либо модуль ОПП с меньшим циклом обращения и вернуться на п. 3.1.

3.3. Построить линейку типов микропроцессоров для ОМ с номинальным быстродействием B_{ni}^{OM} и разрядностью слова Ψ_i , $i = \overline{1, P}$, где P — число представленных типов микропроцессоров. Определить вектор коэффициентов стоимости $C_{ni}^{OM}(B_{ni}^{OM}, \Psi_i)$, $i = \overline{1, P}$.

3.4. Построить линейку типовых модулей для ОПП с циклом обращения τ_i^{COP} секунд и разрядностью слова Ψ_i бит, $i = \overline{1, G}$, где G — число представленных типовых модулей памяти. Определить вектор коэффициентов стоимости $C_i^L(\tau_i^L, \Psi_i)$.

3.5. Определить способ комплексирования ОМ и КМ с ОПП и коэффициент стоимости C^{CK} .

4. Введение параметров ГА:

- Z — числа особей в популяции;
- $\chi_1, \chi_2, \chi_3, \chi_4$ — порядка операции кроссовера для разных хромосом;
- q — вероятности мутации гена;
- $\varepsilon, K^{доп}$ — критерия останова.

Каждая особь популяции описывается набором из четырех хромосом:

- N — число ОМ;
- $B_{n1}^{OM}, \dots, B_{nP}^{OM}$ — линейка представленных быстродействий процессоров ОМ;
- M — число секций, на которые может быть разбита общая память;
- $\tau_1^{COPP}, \dots, \tau_G^{COPP}$ — линейка представленных быстродействий (времени доступа) памяти.

5. Реализация на ЭВМ алгоритма параметрической оптимизации.

5.1. Выбрать начальную популяцию S_0 , включающую Z особей.

Особь $s \in S_0$ включить в популяцию только при выполнении ограничений

$$\Lambda(j) \geq \frac{1}{L} \sum_{i=1}^S v_i \delta_i \quad (5)$$

и

$$\bar{t}_3 \leq t_3^A. \quad (6)$$

Если хотя бы одно из условий (5), (6) не выполняется, то особь в популяцию не включается.

Положить номер популяции $k := 0$.

5.2. Вычислить приспособленность каждой особи популяции $\Phi(s)$, $s = 1, \dots, Z$, и приспособленность популяции в целом

$$\Phi_k^* = \min\{\Phi(s) \mid s = 1, 2, \dots, Z\},$$

где s — номер особи в популяции, который позволяет однозначно определить соответствующий

этой особи генотип; $\Phi(s)$ — целевая функция задачи оптимизации.

5.3. Селекция. Случайным образом (метод рулетки) выбрать родителей s_1, s_2 из популяции k для следующего потомства в соответствии с распределением вероятностей $P_1, \dots, P_s, \dots, P_Z$, где

$$P_s = \frac{\Phi(s)}{\sum_{s \in S_k} \Phi(s)}.$$

5.4. Скрещивание. Построить хромосому потомка s'_i по s_1, s_2 при помощи оператора χ_i — точечного кроссовера применительно к i -й хромосоме.

5.5. Мутация. Модифицировать s'_i с вероятностью q , заменив значение каждого гена потомка на противоположное.

5.6. Формирование новой популяции, которая объединяет решения следующего поколения. Для этого Z раз выполнить операции алгоритма, начиная с шага 5.3, помещая каждую вновь полученную особь в следующую популяцию S_{k+1} . Затем положить номер новой популяции $k := k + 1$ и перейти к шагу 5.7.

5.7. Останов. Если приспособленность L последних популяций увеличилась на величину меньшую, чем ε , или если $k = K^{доп}$, то остановить процесс эволюции. В качестве решения задачи оптимизации взять наилучшую из найденных особей последней популяции.

Процедура построения ЦС корпоративной информационной сети считается завершенной.

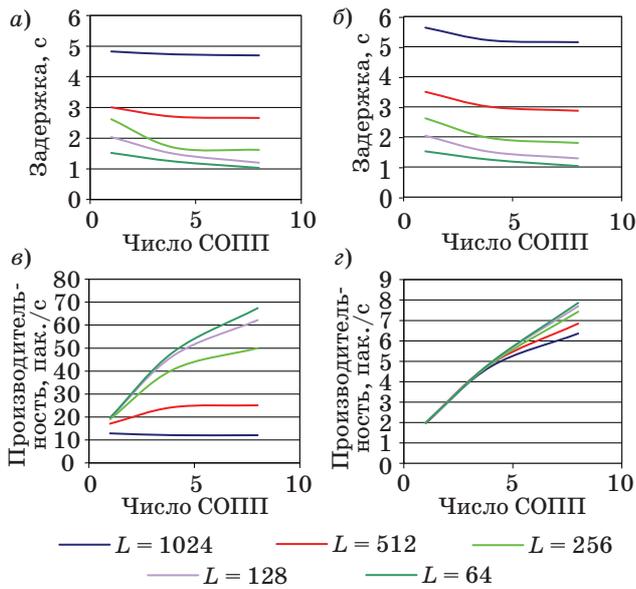
Результаты работы алгоритма оптимизации

Для коммутатора с общей памятью ГА позволяет определить оптимальное число секций памяти для обеспечения заданной производительности коммутатора. Результаты работы представлены на рис. 2, а–г.

Для коммутатора с общей шиной ГА позволяет подобрать производительность шины при известной входной нагрузке или определить максимально возможное количество портов, подключаемых к шине, если производительность шины уже задана.

Для ЦС, выполняющих функции объединения и согласования разнородных сетей начиная с третьего уровня эталонной модели взаимодействия открытых систем, ГА находит оптимальное число как секций памяти, так и процессоров обработки (ОМ). Результаты работы алгоритма представлены в табл. 1 и на рис. 3.

Выбор структуры ЦС типа маршрутизатор/плюс выполнялся с исходными данными, представленными в табл. 2, при симметричном трафике. Результаты работы по подбору структуры отображены в табл. 3.



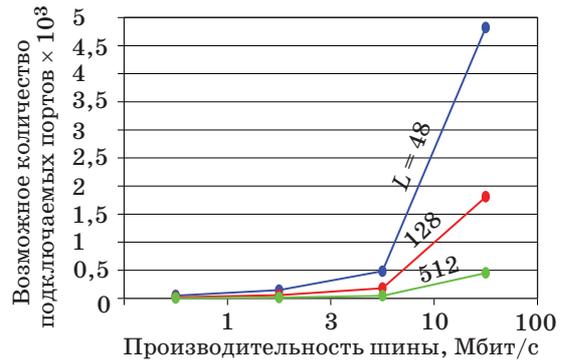
■ **Рис. 2.** Зависимость от числа секций ОПП: средней задержки при $\rho = 0,3$ (а) и $\rho = 0,9$ (б); производительности при $\rho = 0,3$ (в) и $\rho = 0,9$ (г)

■ **Таблица 1.** Максимальное количество портов, подключаемых к шине

L_n , Б	Нагрузка на входе, пак./с					
	10	50	100	200	500	1000
Производительность шины 1 Мб/с						
48	48	10	5	2	1	–
128	18	4	2	1	–	–
512	4	1	–	–	–	–
Производительность шины 3 Мб/с						
48	145	29	14	7	3	1
128	54	11	5	3	1	–
512	13	3	1	1	–	–
Производительность шины 10 Мб/с						
48	482	96	48	24	10	5
128	181	36	18	9	4	2
512	45	9	4	2	1	–
Производительность шины 100 Мб/с						
48	4822	964	482	241	96	48
128	1808	362	181	90	36	18
512	452	90	45	23	9	4

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

- синтез структуры ЦС в большей степени определяется нагрузкой, поступающей на входы ЦС;
- синтез структуры ЦС любого уровня возможен только из предположения симметричности



■ **Рис. 3.** Зависимость количества портов от производительности шины

■ **Таблица 2.** Исходные данные для подбора структуры ЦС типа маршрутизатор/шлюз

Номер порта i	V_i , бит/с	L_i , Б	Номер порта i	V_i , бит/с	L_i , Б
1	3×10^6	32	33	48×10^3	1024
2	12×10^5	64	34	$9,6 \times 10^3$	1024
3	96×10^3	128	35	$1,5 \times 10^6$	32
4	48×10^3	256	36	10^6	32
5	48×10^3	512	37	5×10^8	32
6	$9,6 \times 10^3$	1024	38	10^8	32
7	10^6	32	39	10^6	64
8	5×10^5	32	40	5×10^5	64
9	5×10^5	64	41	5×10^5	64
10	15×10^5	64	42	15×10^5	64
11	10^5	128	43	10^5	128
12	10^5	128	44	10^5	128
13	96×10^3	256	45	96×10^3	128
14	48×10^3	256	46	48×10^3	128
15	10^4	512	47	10^4	256
16	96×10^3	512	48	96×10^3	256
17	3×10^6	32	49	48×10^3	1024
18	12×10^5	64	50	$9,6 \times 10^3$	1024
19	96×10^3	128	51	15×10^5	32
20	48×10^3	256	52	10^6	32
21	48×10^3	512	53	5×10^8	32
22	$9,6 \times 10^3$	1024	54	10^8	32
23	10^6	32	55	10^6	64
24	5×10^5	32	56	10^5	64
25	5×10^5	64	57	10^5	64
26	15×10^5	64	58	15×10^5	64
27	10^5	128	59	10^5	128
28	10^5	128	60	10^5	128
29	96×10^3	256	61	96×10^3	128
30	48×10^3	256	62	48×10^3	128
31	10^4	512	63	10^4	256
32	96×10^3	512	64	96×10^3	256

■ **Таблица 3.** Определение структуры ЦС при разной входной нагрузке

Количество портов	Нагрузка	Число ОМ	Число СОПП	Время считывания, мкс	Номинальное быстродействие, опер./с
4	0,1	1	1	2	10^3
	0,3	3	1	2	10^3
	0,5	1	1	1	5×10^3
	0,7	2	1	1	5×10^3
	0,9	1	1	1	10^4
	1	2	1	1	10^4
8	0,1	2	1	2	10^3
	0,3	1	1	2	5×10^3
	0,5	3	2	2	5×10^3
	0,7	1	1	2	10^4
	0,9	1	1	1	10^4
	1	2	1	1	10^4
16	0,1	2	1	5×10^{-1}	10^3
	0,3	2	2	5×10^{-1}	5×10^3
	0,5	1	1	5×10^{-1}	10^4
	0,7	2	1	10^{-1}	10^4
	0,9	2	1	10^{-1}	5×10^4
	1	2	2	10^{-1}	5×10^4
32	0,1	1	1	10^{-1}	5×10^3
	0,3	1	1	10^{-1}	5×10^4
	0,5	3	2	10^{-1}	5×10^4
	0,7	4	4	10^{-1}	10^5
	0,9	6	5	10^{-1}	10^5
	1	7	5	10^{-2}	10^5
64	0,1	6	6	10^{-2}	10^6
	0,3	10	6	10^{-2}	10^6
	0,5	14	8	10^{-2}	10^6
	0,7	8	5	10^{-3}	10^7
	0,9	10	7	10^{-3}	10^7
	1	12	10	10^{-3}	10^7

Литература

1. Tanenbaum A. Computer Networks. 4th ed. — Prentice Hall, 2002. — 912 p.
2. Gilbert H. Making Your Data Center Energy Efficient. — Taylor & Francis, 2011. — 286 p.
3. Tatarnikova T., Kolbanev M. Statement of a Task Corporate Information Networks Interface Centers Structural Synthesis // IEEE EUROCON. Saint-Petersburg, 2009. P. 1883–1887.
4. Советов Б. Я., Колбанёв М. О., Татарникова Т. М. Технологии инфокоммуникации и их роль в обеспечении информационной безопасности // Геополитика и безопасность. 2014. № 1. С. 69–77.
5. Татарникова Т. М. К расчету основных характеристик шлюза распределенных сетей // Тр. учебных заведений связи. 2000. № 166. С. 62–68.
6. Колбанёв М. О., Татарникова Т. М., Малков К. О. Подход к организации адаптивного согласующего центра корпоративной сети // Информационно-управляющие системы. 2008. № 3(34). С. 28–31.
7. Кутузов О. И., Сергеев В. Г., Татарникова Т. М. Коммутаторы в корпоративных сетях. Модели-

выходного трафика, при асимметричном трафике необходимо проводить эксперимент на модели; — частота обращения к общему ресурсу (памяти, шине) определяется длиной пакета и длиной машинного слова, на который настроен процессор порта, и количеством информационных ресурсов, необходимых для выполнения протокольных процессов.

Заключение

Определен минимально полный набор структурных элементов, покрывающий все многообразие вариантов ЦС, что позволяет обеспечить универсальность модели ЦС в различных задачах синтеза его структуры.

Определено множество внешних параметров, характеризующих ЦС с точки зрения выполняемых ими функций для корпоративной сети. Выбраны показатели эффективности и качества ЦС. В результате сформулирована задача исследования как разработка методики синтеза оптимальной конфигурации ЦС в зависимости от внешних условий с обеспечением необходимого качества обслуживания.

Получены и представлены некоторые результаты оптимизации структуры ЦС:

- коммутатора с общей памятью (определяется число СОПП);
- коммутатора с общей шиной (определяется число портов ввода/вывода);
- маршрутизатора/шлюза (определяется число СОПП и ОМ).

рование и расчет. — СПб.: Судостроение, 2003. — 170 с.

8. Татарникова Т. М., Аль-Хаками А. М. Оценка вероятностно-временных характеристик сетей хранения данных SAN // Программные продукты и системы. 2009. № 4. С. 177–179.
9. Воробьёв А. И., Колбанёв М. О., Татарникова Т. М. Оценка вероятностно-временных характеристик процесса предоставления информационно-справочных услуг // Приборостроение. 2014. № 9. С. 15–18.
10. Советов Б. Я., Колбанёв М. О., Татарникова Т. М. Оценка вероятности эрланговского старения информации // Информационно-управляющие системы. 2013. № 6(67). С. 25–28.
11. Кутузов О. И., Татарникова Т. М. Моделирование систем и сетей телекоммуникаций. — СПб.: РГГМУ, 2012. — 134 с.
12. Татарникова Т. М., Кутузов О. И. Подход к оптимизации структуры межсетевое устройства с привлечением генетических алгоритмов // Изв. ГЭТУ «ЛЭТИ». 2006. № 1. С. 61–67.

UDC 004.71

doi:10.15217/issn1684-8853.2015.3.92

Structural Synthesis of an Interface Center for Corporate NetworksTatarnikova T. M.^a, Dr. Sc., Tech., Docent, tm-tatarn@yandex.ru^aSaint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaya St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation

Purpose: The functions of combining and harmonizing heterogeneous networks in the structure of a corporate network are performed in interface centers of various levels: bridges, switches, routers and gateways. These interface centers are based on processors with typical architectures: I386, PowerPC, ARM, RISC, etc. The architecture is rigidly anchored to the functionality, making it difficult to flexibly manage the resources and distribute the load. On fixed tasks, the performance of an interface center is used only by 10–20%. An alternative is a dynamic adjustment of the interface center structure, depending on the task and on the ambient conditions. The purpose of this work is developing methods for building interface centers for heterogeneous information networks with a given set of properties. **Results:** A model is proposed for an interface center of corporate information networks, with a minimally complete set of structural elements common for all kinds of interface centers. This model is versatile for many problems of interface center structure synthesis. A structural synthesis technique is developed, different from the existing ones, as it jointly uses the stages of automatic generation of many alternative structures for an interface center using a genetic algorithm and "manual" selection of the preferred option for multicriteria synthesis of the interface center structure under conditions close to real ones. **Practical relevance:** The technique of interface center structure synthesis may find application in solving the problems of developing corporate information systems and choosing network equipment.

Keywords — Heterogeneous Networks, Corporate Network, Interface Center, Switch, Router, Gateway, Structural Synthesis, Quality Score, Optimization of Structure, Genetic Algorithm.

References

1. Tanenbaum A. *Computer Networks*. 4th Ed. Prentice Hall, 2002. 912 p.
2. Gilbert H. *Making Your Data Center Energy Efficient*. Taylor & Francis, 2011. 286 p.
3. Tatarnikova T., Kolbanov M. Statement of a Task Corporate Information Networks Interface Centers Structural Synthesis. *IEEE EUROCON*, Saint-Petersburg, 2009, pp. 1883–1887.
4. Sovetov B. Y., Kolbanov M. O., Tatarnikova T. M. Infocommunication Technologies and their Role in Information Security. *Geopolitika i bezopasnost'*, 2014, vol. 25, no. 1, pp. 69–77 (In Russian).
5. Tatarnikova T. M. On the Calculation of the Main Characteristics of the Gateway WAN. *Trudy uchebnykh zavedenii svyazi*, 2000, no. 166, pp. 62–68 (In Russian).
6. Kolbanov M. O., Tatarnikova T. M., Malkov K. O. An Approach to Set Up a Corporate Network Matching Center. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2008, no. 3(34), pp. 28–31 (In Russian).
7. Kutuzov O. I., Sergeev V. G., Tatarnikova T. M. *Kommutatory v korporativnykh setyakh. Modelirovanie i raschet*. [Switches in Corporate Networks. Modeling and Calculation]. Saint-Petersburg, Sudostroenie Publ., 2003. 170 p. (In Russian).
8. Tatarnikova T. M., Ali Alhakami A. M. Likelihood-time Characteristics Estimation of Storage Area Network. *Software & Systems*, 2009, vol. 88, no. 4, pp. 177–179 (In Russian).
9. Vorobyov Andrey I., Kolbanov Mikhail O., Tatarnikova Tatiana M. Assessment of Probabilistic-Temporal Characteristics of the Process of I&R Service Rendering. *Pribo-rostroenie*, 2014, no. 9, pp. 15–18 (In Russian).
10. Sovetov B. Y., Kolbanov M. O., Tatarnikova T. M. Evaluation of Probability of Erlang Information Aging. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2013, no. 6(67), pp. 25–28 (In Russian).
11. Kutuzov O. I., Tatarnikova T. M. *Modelirovanie sistem i setey telekommunikatsiy* [Simulation of Systems and Telecommunications Networks]. Saint-Petersburg, RSHU Publ., 2012. 134 p. (In Russian).
12. Tatarnikova T. M., Kutuzov O. I. Approach to Optimize the Structure of Internetworking Devices Involving Genetic Algorithms. *Izvestia GETU "LETI"*, 2006, no. 1, pp. 61–67 (In Russian).

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ МУЛЬТИСТАРТА И ПОИСКА С ЗАПРЕТАМИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ РАЗМЕЩЕНИЯ БАЗОВЫХ СТАНЦИЙ

Е. С. Скаков^а, аспирант

В. Н. Малыш^а, доктор техн. наук, профессор

^аЛипецкий государственный педагогический университет, Липецк, РФ

Постановка проблемы: синтез топологической структуры беспроводной сети передачи данных подразумевает планирование территориального размещения базовых приемо-передающих станций на местах-кандидатах и подключение к ним клиентов. Недостатками существующих подходов к решению этой задачи являются использование методов, не показывающих высокую скорость расчета (метода ветвей и границ, эвристического метода Лагранжа и др.); отсутствие ограничений, учитывающих уровень затухания сигнала при распространении от базовой станции к клиенту и обратно, а также уровень межсотовых помех; использование всего одного типа базовых станций. Целью исследования является создание модели решения задачи размещения базовых станций, не имеющей указанных недостатков. **Результаты:** сформулирована задача размещения базовых станций с учетом уровня отношения сигнала к помехам для клиентов сети. Решение задачи представляется в виде вектора структур, каждая из которых хранит информацию об одном месте-кандидате (тип установленной базовой станции, список подключенных клиентов). Разработаны модификации алгоритмов вероятностного поиска с запретами и мултистарта, в основе которых лежит понятие окрестности текущего решения. Новое решение из окрестности текущего может быть получено при помощи одной из шести операций: смены типа одной станции на более дешевый/дорогой, переподключения одного клиента, удаления одной базовой станции, добавления одной станции, перемещения одной базовой станции. С целью избежать «застревания» в локальных оптимумах при поиске с запретами алгоритму запрещается просматривать решения из списка запретов. Новизна подхода заключается в том, что в список запретов добавляются не конкретные прошлые решения, а операции по изменению конфигурации сети, которые могут вернуть нас в старые локальные оптимумы. Сущность модифицированного алгоритма мултистарта состоит в следующем: используются всего две операции для получения нового решения (удаление базовой станции и смена типа на более дешевый), просматривается только часть окрестности, переход к новому решению осуществляется по принципу «первое улучшение», алгоритм поиска лучшего решения запускается несколько раз. Разработанные алгоритмы реализованы как программное обеспечение на языке Delphi. Показано, что новые алгоритмы демонстрируют лучшие результаты, чем метод локального поиска. **Практическая значимость:** разработанные модификации методов мултистарта и поиска с запретами позволяют находить решение задачи размещения базовых станций за приемлемое время, на много порядков быстрее точного метода полного перебора. Выявлена зависимость качества решения поставленной задачи методом вероятностного поиска с запретами от длины списка запретов и значения параметра рандомизации окрестности.

Ключевые слова — размещение базовых станций, алгоритм мултистарта, поиск с запретами, беспроводные сети, оптимизация, SIR.

Введение

Как известно [1], задача проектирования сети (в том числе и беспроводной) может быть сведена к отысканию минимума функционала приведенной стоимости при наличии ограничений на вероятностно-временные и структурные характеристики сети и при требовании принадлежности множества вариантов архитектуры сети к области технически реализуемых решений.

Среди русскоязычных публикаций по проблеме размещения базовых станций (БС) отметим работу [2], посвященную сетям WiMAX. Подробная классификация алгоритмов размещения БС для сетей UMTS 3G дана в статье [3].

В данной работе сформулирована задача размещения БС, учитывающая уровень затухания сигнала при распространении от БС к клиенту и обратно, уровень межсотовых помех и наличие в сети нескольких типов БС. Поставленная задача решается метаэвристическими методами вероят-

ностного поиска с запретами (ПЗ) и мултистарта (МС), демонстрирующими высокую скорость и точность нахождения решения.

Постановка задачи размещения БС

Задача размещения БС заключается в том, что у нас есть N_{tp} клиентов, каждого из которых необходимо подключить к БС. Базовая станция может быть установлена на одном из N_{ps} мест-кандидатов. Имеется N_{types} типов БС, отличающихся по своим характеристикам. Задача сводится к минимизации общей стоимости установленных БС при выполнении ряда ограничений.

Для описания решения задачи размещения БС нам необходимо воспользоваться такой единицей представления данных, как структура. Структура — композитный тип данных, позволяющий хранить совокупность переменных различного типа (полей), объединенных одним

именем [4]. В нашем случае структура содержит в себе три поля:

- переменную $type$, показывающую, какого типа БС установлена на данном месте-кандидате (если $type = 0$, то БС не установлена);
- переменную cl_nbr — число клиентов, подключенных к данному месту;
- одномерный массив (вектор) целых чисел CL размерности cl_nbr , содержащий номера клиентов, подключенных к данному месту.

Решение задачи мы будем представлять в качестве вектора Sol , элементами которого являются структуры, соответствующие местам-кандидатам (здесь и в дальнейшем запись вида $A[j]$ означает обращение к j -му элементу вектора A ; элементы массивов нумеруются, начиная с 1). Обращение к полю обозначается при помощи символа «.». То есть $Sol[4].type$ означает тип БС 4-го места-кандидата, а, например, $Sol[5].CL[3]$ — номер 3-го клиента, подключенного к БС на месте № 5.

Клиент может быть подключен к месту-кандидату, только если на нем уже установлена БС, т. е. для каждого места, у которого $Sol[s].cl_nbr \neq 0$, должно выполняться неравенство $Sol[s].type \neq 0$.

Пусть \mathbf{b} — вектор, элементами которого являются требуемые полосы пропускания для клиентов; β — вектор, элементами которого являются максимальные производительности БС разного типа. Для каждой установленной БС суммарный требуемый трафик не должен превосходить максимально возможную производительность оборудования:

$$\sum_{i=1}^{Sol[s].cl_nbr} \mathbf{b}[Sol[s].CL[i]] \leq \beta[Sol[s].type] \quad \forall s \in \{1, 2, \dots, N_{ps}\}. \quad (1)$$

Пусть \mathbf{P}_{BS}^{\max} — вектор, элементами которого являются максимальные мощности БС разного типа; \mathbf{P}_{TP}^{\max} — вектор максимальных мощностей клиентов; $\mathbf{P}_{BS}^{\text{tar}}$ — вектор, элементами которого являются чувствительности БС разного типа; $\mathbf{P}_{TP}^{\text{tar}}$ — вектор, элементами которого являются чувствительности клиентов; \mathbf{G} — двумерный массив (матрица) размерности $N_{tp} \times N_{ps}$, каждый элемент которого $0 \leq G[i][s] \leq 1$ отражает уровень затухания между i -м клиентом и местом установки s .

Несмотря на затухание сигнала на пути от БС к клиенту, мощность, доходящая от приемника к передатчику, должна превышать минимальную целевую мощность:

$$\frac{G[Sol[s].CL[i]][s] \cdot \mathbf{P}_{BS}^{\max}[Sol[s].type]}{\mathbf{P}_{TP}^{\text{tar}}[Sol[s].CL[i]]} \geq 1 \quad \forall s \in \{1, 2, \dots, N_{ps}\}, \quad \forall i \in Sol[s].CL. \quad (2)$$

Ограничение (2) составлено для режима downlink. Для режима uplink аналогичное ограничение выглядит следующим образом:

$$\frac{G[Sol[s].CL[i]][s] \cdot \mathbf{P}_{TP}^{\max}[Sol[s].CL[i]]}{\mathbf{P}_{BS}^{\text{tar}}[Sol[s].type]} \geq 1 \quad \forall s \in \{1, 2, \dots, N_{ps}\}, \quad \forall i \in Sol[s].CL. \quad (3)$$

Целевая функция, которую необходимо минимизировать, имеет вид

$$\Phi = \sum_{s=1}^{N_{ps}} \text{Cost}[Sol[s].type] + \sum_{s=1}^{N_{ps}} \sum_{i=1}^{Sol[s].cl_nbr} SIR_{dB}^{si} \cdot k, \quad (4)$$

где Cost — вектор стоимостей (включая установку) БС разного типа.

Первое слагаемое (4) — суммарная стоимость комплекса. Второе слагаемое отвечает за учет уровня SIR для всех клиентов системы. SIR — отношение уровня сигнала к уровню помех (signal-to-interference ratio) [5], в общем случае оно рассчитывается так:

$$SIR_{dB} = 10 \lg(P_{\text{signal}}/P_{\text{interference}}). \quad (5)$$

В нашей задаче мы рассчитываем SIR отдельно для каждого клиента. В числителе фигурирует получаемый сигнал от той БС, к которой подключен клиент, в знаменателе — сигналы от остальных БС, которые создают помехи:

$$SIR_{dB}^{si} = \frac{G^{si} \cdot \mathbf{P}_{BS}^{\max}[Sol[s].type]}{\sum_{q=1}^{N_{ps}} \sum_{z=1}^{Sol[q].cl_nbr} G^{qz} \cdot \mathbf{P}_{BS}^{\max}[Sol[q].type] \cdot w_{siqz}}, \quad (6)$$

$$G^{si} = G[Sol[s].CL[i]][s],$$

$$G^{qz} = G[Sol[q].CL[z]][q],$$

где $w_{siqz} = 0$, если $s = q$ и $i = z$, иначе $w_{siqz} = 1$.

Коэффициент k обеспечивает одновременный учет в целевой функции затрат на создание сети и уровня SIR клиентов. k имеет размерность стоимости комплекса БС, тем самым обеспечивая сохранение размерности в формуле (4), так как SIR — безразмерная величина. k должен обеспечивать «штраф» за низкий уровень SIR и «награду» за высокий. В данной работе принято $k = -10$ условных единиц стоимости (k имеет отрицательное значение, так как мы решаем минимизационную задачу, а значит, хороший высокий уровень SIR должен уменьшать целевую функцию).

Необходимо отсортировать типы БС по возрастанию цены. В дальнейшем мы будем исходить из того, что i -й тип БС дороже $(i - 1)$ -го и дешевле $(i + 1)$ -го.

Метод локального поиска

Для начала мы предлагаем рассмотреть алгоритм локального поиска (ЛП), так как именно он лежит в основе большинства метаэвристических методов оптимизации. Данный алгоритм является итеративным методом. На каждом шаге рассматривается некоторое множество соседних решений — так называемая окрестность текущего решения. В качестве следующего из нее выбирается решение, доставляющее максимум оценочной функции. Процесс продолжается до тех пор, пока в окрестности имеются решения лучшие, чем текущие по отношению к оценочной функции [6].

Ниже представлен простейший алгоритм ЛП для задачи минимизации [7]. Предполагается, что вектор x — решение некоторой оптимизационной задачи. Множество всех возможных векторов обозначим X . Пусть требуется минимизировать некоторую функцию $f(x)$ на множестве X :

1. x_0 — начальное решение.
2. Текущее решение $x = x_0$.
3. Построить окрестность соседних решений $N(x)$.
4. Найти такое решение $z \in N(x)$, что $f(z) \leq f(y)$ для всех $y \in N(x)$.
5. Положить $x = z$.
6. Если окрестность соседних решений не содержит ни одного решения, улучшающего целевую функцию, то работа алгоритма прекращается, x — результат, иначе перейти к шагу 3.

Метод поиска с запретами

Метод поиска с запретами (Tabu Search) является одним из наиболее эффективных метаэвристических методов. Предложил его в 80-е гг. Ф. Гловер (F. Glover) [8, 9]. Отличительная черта этого метода заключается в процессе введения и снятия некоторых искусственных ограничений задачи в ходе поиска решения [6].

Основным недостатком метода ЛП является его остановка при достижении локального оптимума. Мы же ищем глобальный оптимум. Очевидно, что глобальный оптимум есть также и локальный, поэтому для успешного поиска решений мы должны как-то переходить от одного локального оптимума к другому [10].

В методе ПЗ с целью преодолеть вышеописанный недостаток вводится так называемый список запретов (Tabu List). Этот список хранит некоторое количество предыдущих решений, и при выборе нового решения запрещается выбирать из окрестности решения, содержащиеся в списке запретов [10]. Данный прием помогает избегать «застревания» в локальном оптимуме, расширяет пространство поиска, позволяя алгоритму поиска с запретами находить лучшие решения, чем метод ЛП.

Метод мультистарта

Как уже было сказано, глобальный оптимум является в то же самое время одним из локальных оптимумов. Соответственно, если просмотреть все локальные оптимумы и выбрать из них лучший, то это даст нам окончательное решение задачи. Метод МС нацелен на то, чтобы обойти как можно большее число локальных оптимумов [11]. Суть метода проста: алгоритм ЛП (вернее, его модификация) запускается несколько раз. Лучшее решение, полученное при каждом запуске поиска, сохраняется в памяти. По окончании времени поиска лучший из локальных оптимумов возвращается в качестве решения задачи.

Метод даст хорошие результаты при выполнении двух условий [11]:

— каждый запуск алгоритма (будем называть его старт) должен стартовать из нового начального решения;

— сама процедура ЛП должна быть выполнена так, чтобы каждый новый старт по возможности приводил в новый локальный оптимум. Это необходимо для расширения пространства поиска.

Метод МС показывает результаты, сопоставимые с другими метаэвристиками, и поэтому часто используется для решения NP-трудных задач [12, 13].

Окрестность решения

Понятие «окрестность» является самым интересным в метаэвристиках, основанных на ЛП. Оно плохо формализовано и для каждой конкретной задачи оптимизации обладает своей спецификой. В случае задачи размещения БС мы имеем решение, представленное в виде ряда БС с подключенными к ним клиентами. Необходимо определить, какие решения являются наиболее близкими к нашему. Нами был предложен метод формирования окрестности решения посредством осуществления небольших изменений в текущем решении. Новое решение из окрестности текущего решения можно получить одним из шести способов (операций).

1. *Смена типа одной БС на более дешевый.* Подобного рода операция ($Sol[s].type = Sol[s].type - 1$) возможна для каждого элемента массива Sol , у которого $Sol[s].type > 1$. При новой конфигурации БС мы должны проверить решение Sol на соответствие требованиям (1)–(3).

2. *Смена типа одной БС на более дорогой.* Данная операция ($Sol[s].type = Sol[s].type + 1$) возможна для каждого элемента массива Sol , у которого $Sol[s].type \neq N_{types}$ и $Sol[s].type \neq 0$.

3. *Переподключение одного клиента* (т. е. подключение к другой БС). Данная операция возможна для каждого клиента. Если мы ищем

новую БС для i -го клиента, то мы должны последовательно [проверяя на соответствие ограничениям (1)–(3)] пробовать подключить его к одному из мест-кандидатов (кроме его текущего места), начиная с самого ближнего к клиенту i . Очевидно, что место w , к которому мы хотим подключить клиента, должно иметь активную БС ($\text{Sol}[w].type \neq 0$).

4. *Удаление одной БС.* Данная операция возможна для каждого активного места-кандидата. Для каждого из клиентов удаляемой станции s мы запускаем операцию «Переподключение одного клиента». Если все клиенты s -й станции можно подключить к другим БС, значит удаление s -й станции возможно.

5. *Добавление одной БС.* Данная операция возможна для каждого пустого места ($\text{Sol}[s].type = 0$). Мы устанавливаем на место s новую станцию и пробуем подключить к ней самого близкого клиента (пусть его номер i). Если такое подключение возможно [для s -го места выполняются ограничения (1)–(3)], то новое решение Sol является допустимым. Клиента с номером i , естественно, необходимо отключить от его старой БС.

6. *Перемещение одной БС.* Данная операция возможна для каждого активного места-кандидата. Пусть мы перемещаем БС с места s . Тогда мы должны последовательно пробовать поместить ее на пустые места-кандидаты, начиная с самого ближнего к месту s , с учетом того, что на новом месте w должны выполняться ограничения (2) и (3).

Алгоритм вероятностного поиска с запретами для решения задачи размещения БС

Рассмотрим рандомизированную окрестность $N_p(\mathbf{x}) \subseteq N(\mathbf{x})$, где каждый элемент окрестности $N(\mathbf{x})$ включается в множество $N_p(\mathbf{x})$ с вероятностью $0 \leq p \leq 1$ (p — параметр рандомизации окрестности) независимо от других элементов [14]. С ненулевой вероятностью множество $N_p(\mathbf{x})$ может совпадать с $N(\mathbf{x})$, может оказаться пустым или содержать ровно один элемент. Алгоритм поиска с запретами, представленный в данном разделе, осуществляет вероятностный ЛП по рандомизированной окрестности (поэтому он называется вероятностный ЛП), совершая шаги как улучшающие, так и ухудшающие целевую функцию, что позволяет алгоритму перемещаться от одного локального оптимума к другому в целях найти среди них лучшее решение.

Использование рандомизированной окрестности $N_p(\mathbf{x})$ дает лучшие результаты по сравнению с просмотром полной окрестности $N(\mathbf{x})$ [14–16]. Очевидно, что при $p = 1$ окрестность $N_p(\mathbf{x})$ совпадает с $N(\mathbf{x})$.

Основным механизмом, позволяющим алгоритму покидать локальные оптимумы, является

список запретов TL . Список строится по предыстории поиска, т. е. по нескольким последним итерациям, и запрещает часть окрестности $N(\mathbf{x})$ текущего решения [7]. В классическом методе поиска с запретами в TL добавляются те решения, которые были признаны лучшими на соответствующей итерации и к которым был применен переход как к новым текущим решениям.

Обновление списка запретов состоит из двух этапов: удаление самого «старого» элемента списка (если текущая длина списка равна максимальной длине l) и добавление в список нового элемента. Однако специфика нашей задачи такова, что для нее характерно очень большое пространство поиска, в котором легко «застрять» в локальной окрестности, принадлежащей одному пику, даже если использовать очень большой список запретов. Возможных решений может быть слишком много.

Поэтому мы предлагаем в список запретов добавлять не решения, а операции, которые нельзя будет осуществлять в течение l следующих итераций. То есть каждое изменение, примененное к решению, порождает запрет на операцию, которая может вернуть нас в это самое решение. Ниже приведены пары «изменение» — «запрет» (далее фразой типа « s -я БС» мы для краткости обозначаем БС, расположенную на s -м месте):

- 1) «смена типа s -й БС на более дешевый» — «смена типа s -й БС на более дорогой»;
- 2) «смена типа s -й БС на более дорогой» — «смена типа s -й БС на более дешевый»;
- 3) «переподключение i -го клиента» — «переподключение i -го клиента»;
- 4) «удаление s -й БС» — «добавление s -й БС»;
- 5) «добавление s -й БС» — «удаление s -й БС»;
- 6) «перемещение s -й БС на w -е место» — «перемещение w -й БС».

Представим общую схему вероятностного поиска с запретами для задачи размещения БС.

1. Построить начальное решение **Curr**.

Введем обозначения: p — параметр рандомизации окрестности; TL — список запретов; **Best_neigh** — лучшее решение в текущей окрестности; $cost_best_neigh$ — целевая функция решения **Best_neigh**; **Best** — лучшее решение задачи.

2. $TL = \emptyset$.

3. **Best = Curr**.

4. Построим окрестность решения **Curr** при помощи шести вышеописанных операций (кроме тех, которые есть в списке запретов TL).

5. $cost_best_neigh = \infty$.

6. Цикл. Для каждого решения **Sol** из построенной окрестности выполним:

6.1. Пусть w — случайное число из диапазона $[0; 1]$. Если $w > p$, то переход к следующей итерации цикла.

6.2. Если решение Sol — недопустимое [не удовлетворяет одному из ограничений (1)–(3)], то переход к следующей итерации цикла.

6.3. Если $\Phi(Sol) < cost_best_neigh$, то $Best_neigh = Sol$ и $cost_best_neigh = \Phi(Sol)$.

7. Если $cost_best_neigh = \infty$, то переход к п. 11.

8. $Curr = Best_neigh$.

9. Обновить TL .

10. Если $\Phi(Curr) < \Phi(Best)$, то $Best = Curr$.

11. Если время работы алгоритма $time$ истекло, то переход к п. 12, иначе к п. 4.

12. Вернем $Best$ в качестве решения задачи.

Алгоритм мултистарта для решения задачи размещения БС

Введем понятие жадного алгоритма. В жадном алгоритме делается выбор, который является самым лучшим в данный момент, т. е. производится локально оптимальный выбор в надежде, что он приведет к оптимальному решению глобальной задачи [17]. В предлагаемом нами методе мултистарта используется жадная эвристика «первое улучшение» [11]. Суть ее заключается в том, что при ЛП мы рассматриваем одно случайное соседнее решение z из окрестности текущего решения x . Если $f(z)$ лучше, чем $f(x)$, то текущим решением становится z . Подобный переход к первому же лучшему решению расширяет пространство поиска, что в сочетании со стартами из разных начальных решений позволит попасть в большее количество разных локальных оптимумов.

Новые потенциальные решения мы будем генерировать не из окрестностей $N(x)$ или $N_p(x)$, а из окрестности $N_{greed}(x)$. $N_{greed}(x)$ — окрестность, получаемая при помощи операций «удаление одной БС» и «смена типа одной БС на более дешевый» к x . Таким образом, $N_{greed}(x)$, в отличие от $N(x)$, содержит только решения с целевой функцией, лучшие, чем у x .

Ниже представлена общая схема алгоритма мултистарта для задачи размещения БС.

1. $i = 0$.

Введем обозначения: N_iter_max — максимальное число итераций алгоритма подряд без улучшения целевой функции; n_iter — число итераций подряд без улучшения целевой функции.

2. $i = i + 1$; $n_iter = 0$.

3. Построить начальное решение $Curr_i$.

4. Сгенерируем Sol — решение из окрестности $Curr_i$, полученное при помощи операции «Удаление одной БС» или «Смена типа одной БС на более дешевый».

5. Если решение Sol — допустимое [удовлетворяет каждому из ограничений (1)–(3)], то переход к п. 6. Если время работы алгоритма истекло, то переход к п. 9, иначе к п. 4.

6. Если $\Phi(Sol) < \Phi(Curr_i)$, то $Curr_i = Sol$ и $n_iter = 0$, иначе $n_iter = n_iter + 1$.

7. Если время работы алгоритма $time$ истекло, то переход к п. 9.

8. Если $n_iter = N_iter_max$, то переход к п. 2, иначе к п. 4.

9. Вернем лучшее из решений $Curr_i$ в качестве окончательного решения задачи.

Компьютерное моделирование

Разработанные алгоритмы реализованы как программное обеспечение в среде Embarcadero Delphi XE5. С его помощью был проведен ряд вычислительных экспериментов по нахождению оптимального расположения БС и подключения к ним клиентов. Моделирование проводилось на компьютере с процессором Intel Core i5-3470 и оперативной памятью 6 ГБ.

Первая серия вычислительных экспериментов была посвящена исследованию быстродействия и точности предложенных модификаций методов ПЗ и МС путем сравнения их с методом полного перебора (ПП). Принцип алгоритма ПП очень прост: мы должны перебрать все возможные решения задачи, отсеять все недопустимые решения, а среди оставшихся выбрать лучшее (с точки зрения значения целевой функции). Так как метод ПП не позволяет решать задачу за полиномиальное время, сравнение проводилось на задачах малой и средней размерности.

Пусть $N_{types} = 2$. Эксперименты проводились на 9 тестовых задачах (по 3 значения N_{tp} и N_{ps} порождают 9 комбинаций). Зафиксируем параметры алгоритма ПЗ: $l = 50$, $p = 0,15$, $time = 0,1$ с. Параметры алгоритма МС: $N_iter_max = 50$, $time = 0,1$ с. Результаты работы алгоритмов приведены в табл. 1. Каждая ячейка табл. 1 содержит три строки: верхняя — это время работы алгоритма ПЗ в секундах, в скобках — значение соответствующей целевой функции в условных единицах, средняя и нижняя — аналогичные

■ Таблица 1. Сравнение результатов алгоритмов поиска с запретами и мултистарта с методом полного перебора

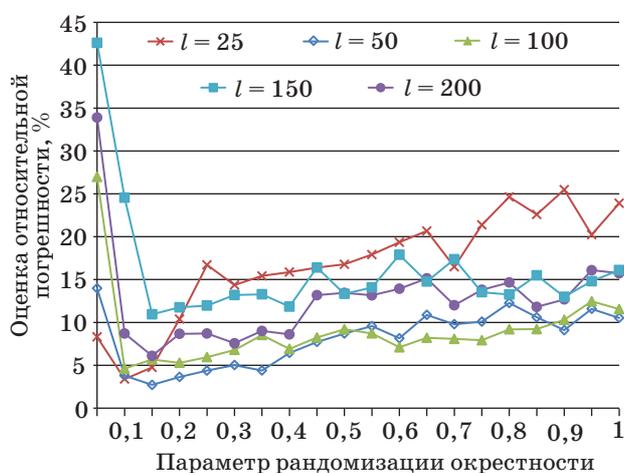
N_{tp}	N_{ps}		
	5	7	10
3	0,100 с (27 382)	0,100 с (26 784)	0,100 с (26 516)
	0,100 с (27 382)	0,100 с (26 784)	0,100 с (26 516)
	0,030 с (27 382)	0,710 с (26 784)	65,19 с (26 516)
5	0,100 с (26 776)	0,100 с (26 570)	0,100 с (26 476)
	0,100 с (26 776)	0,100 с (26 570)	0,100 с (26 476)
	0,606 с (26 776)	31,59 с (26 570)	5140,7 с (26 476)
7	0,100 с (26 458)	0,100 с (26 396)	0,100 с (26 230)
	0,100 с (26 458)	0,100 с (26 396)	0,100 с (26 230)
	14,65 с (26 458)	1390 с (26 396)	455798 с (26 230)

величины для МС и ПЗ соответственно. Время решения задачи для методов ПЗ и МС приводится как среднее за 10 запусков алгоритма, значение целевой функции — как лучшее за 10 запусков алгоритма. Представленные в табл. 1 данные свидетельствуют о том, что на задачах малой размерности предложенные алгоритмы обеспечивают получение точных значений целевой функции, как и метод ПП, который дает точное решение при каждом запуске алгоритма. При этом алгоритмы ПЗ и МС справляются с решением задач размещения БС за очень малое время.

Далее был проведен ряд вычислительных экспериментов с целью выявить влияние параметра рандомизации окрестности p и длины списка запретов l на качество получаемых решений методом ПЗ. В качестве тестового примера была выбрана задача следующей размерности: $N_{tp} = 100$, $N_{ps} = 100$, $N_{types} = 3$. Результаты эксперимента представлены на рисунке. По оси абсцисс отложены значения p в диапазоне [5 %; 100 %] с дискретностью 5 %. По оси ординат отложены значения оценки относительной погрешности решений, которая считается как среднее отклонение полученных решений от лучшего из известных решений задачи. Для каждой пары p и l приведены усредненные результаты за 50 запусков, $time = 20$ с.

Как видно из графиков, на данных примерах алгоритм ПЗ достигает наибольшей эффективности при $p \in [0,1; 0,35]$, что в целом согласуется с результатами работы [14]. Также выявлено, что при значениях длины списка запретов, равных 50–100, алгоритм поиска с запретами показывает наилучшие результаты. Наилучшее значение оценки относительной погрешности получено при $l = 50$ и $p = 0,15$ (2,709 %).

Также был проведен ряд вычислительных экспериментов с целью сравнить эффективность методов ЛП, ПЗ и МС при решении задач разной



■ Влияние рандомизации окрестности и длины списка запретов на относительную погрешность решений

■ Таблица 2. Сравнение результатов локального поиска, алгоритма поиска с запретами и метода мултистарта

Размерность задачи ($N_{tp} \times N_{ps} \times N_{types}$)	Метод		
	ЛП	ПЗ	МС
50×50×3	0,191 с 32,775 %	0,191 с 20,598 %	0,191 с 13,828 %
100×100×3	2,535 с 31,690 %	2,535 с 13,194 %	2,535 с 9,170 %
150×150×3	11,933 с 38,305 %	11,933 с 22,039 %	11,933 с 13,299 %
200×200×3	36,389 с 24,008 %	36,389 с 16,130 %	36,389 с 13,700 %

размерности. Зафиксируем параметры алгоритма ПЗ: $l = 50$, $p = 0,15$. Параметры алгоритма МС: $N_{iter_max} = 50$. Моделирование производилось следующим образом: сначала каждую из задач мы решали методом ЛП (усредняя результаты за 50 запусков). Далее мы решали ту же задачу методами ПЗ и МС (те же 50 запусков для каждого метода), ограничивая их работу временем, которое понадобилось методу ЛП для решения задачи. Результаты эксперимента приведены в табл. 2. Каждая ячейка таблицы содержит две строки: верхняя — это время работы алгоритма, нижняя — значение оценки относительной погрешности решений, получаемых данным алгоритмом. Из таблицы видно, что методы ПЗ и МС решают задачу размещения БС лучше, чем алгоритм ЛП. При этом алгоритм МС показывает лучшие результаты, чем вероятностный ПЗ.

Заключение

Проведенное компьютерное моделирование позволяет сделать следующие выводы.

1. Предложенные модификации алгоритмов поиска с запретами и мултистарта способны решать задачу размещения БС.

2. Для задач малой и средней размерности результаты методов ПЗ и МС совпадают с результатами метода ПП. При этом предложенные методы решают задачу на много порядков быстрее, чем точный метод ПП.

3. Программное обеспечение, разработанное на базе предложенных алгоритмов, может находить решение задач средней и большой размерности за время, не превышающее 1 мин.

4. Рекомендованными параметрами алгоритма ПЗ, позволяющими находить хорошее решение за приемлемое время, являются следующие: $l = 50-100$, $p = 0,1-0,35$.

5. Предложенные модификации методов ПЗ и МС решают задачу размещения БС лучше, чем алгоритм ЛП. При этом алгоритм МС показывает лучшие результаты, чем ПЗ.

Литература

1. Вишнеvский В. М. Теоретические основы проектирования компьютерных сетей. — М.: Техносфера, 2003. — 512 с.
2. Ермолаев С. Ю. Оптимальное размещение базовых станций // Telecommunication Sciences. 2010. № 1. С. 349–355.
3. St-Hilaire M., Chinnek J. W., Chamberland S., Pierre S. Efficient Solution of the 3G Network Planning Problem // Computers & Industrial Engineering. 2012. N 4. P. 819–830.
4. Архангельский А. Я. Программирование в Delphi 7. — М.: Бином-Пресс, 2003. — 1152 с.
5. Koskie S., Gajic Z. A Nash Game Algorithm for SIR-based Power Control in 3G Wireless CDMA Networks // IEEE/ACM Transactions on Networking. 2005. N 5. P. 1017–1026.
6. Усманова А. Р. Метод поиска с запретами для задачи упаковки в контейнеры: дис. ... канд. физ.-мат. наук. — Уфа, 2002. — 101 с.
7. Скаков Е. С. Метод поиска с запретами для решения оптимизационных задач // Новое слово в науке и практике: гипотезы и апробация результатов исследований: тр. 15-й Междунар. конф., Новосибирск, 23 января 2015 г. Новосибирск, 2015. С. 166–171.
8. Glover F. Tabu Search. Part I // ORSA Journal on Computing. 1989. N 3. P. 190–206.
9. Glover F. Tabu Search. Part II // ORSA Journal on Computing. 1990. N 1. P. 4–32.
10. Luke S. Essentials of Metaheuristics. — Lulu, 2013. — 242 p.
11. Gendreau M., Potvin J. Y. Handbook of Metaheuristics. — Springer, 2010. — 669 p.
12. Brønmo G., Christiansen M., Fagerholt K., Nygreen B. A Multi-Start Local Search Heuristic for Ship Scheduling — a Computational Study // Computers & Operations Research. 2007. N 3. P. 900–917.
13. Martí R., Resende M. G. C., Ribeiro C. C. Multi-Start Methods for Combinatorial Optimization // European Journal of Operational Research. 2013. N 1. P. 1–8.
14. Руднев А. С. Вероятностный поиск с запретами для задачи упаковки кругов и прямоугольников в полосу // Дискретный анализ и исследование операций. 2009. № 4. С. 61–86.
15. Гончаров Е. Н., Кочетов Ю. А. Вероятностный поиск с запретами для дискретных задач безусловной оптимизации // Дискретный анализ и исследование операций. 2002. № 2. С. 13–30.
16. Кочетов Ю. А. Методы локального поиска для дискретных задач размещения: дис. ... д-ра физ.-мат. наук. — Новосибирск, 2009. — 267 с.
17. Гончаров Е. Н., Кочетов Ю. А. Поведение вероятностных жадных алгоритмов для многостадийной задачи размещения // Дискретный анализ и исследование операций. 1999. № 1. С. 12–32.

UDC 621.395.7, 519.854

doi:10.15217/issn1684-8853.2015.3.99

Multi-Start and Tabu Search Algorithms for Base Station Location Problem

Skakov E. S.^a, Post-Graduate Student, wallkirya@mail.ruMalyshev V. N.^a, Dr. Sc., Tech., Professor, vmalyshev@mail.ru^aLipetsk State Pedagogical University, 42, Lenina St., 398020, Lipetsk, Russian Federation

Purpose: The synthesis of a topological structure for a wireless data network implies planning territorial distribution of the base transceiver stations on potential sites, and connecting to the clients. The existing approaches to this problem have shortcomings: using solution methods with low computing speed (branch and bound method, heuristic method of Lagrange, etc.); lack of restrictions which would take into account the level of signal fading during its propagation from the base station to the client and back and also the level of inter-cell interference; using only one type of base stations. The goal of this research is creating a model for base station location which would be free from the above-mentioned drawbacks. **Results:** The problem of base station location has been formulated, taking into account the signal-to-interference ratio for the network clients. A problem solution is represented as a vector of structures, each storing the information about one potential site (the installed base station type, the list of connected clients). Modified algorithms of probabilistic tabu search and multi-start have been developed, based on the concept of current solution neighborhood. A new solution from the neighborhood of the current solution can be obtained using one of the following six operations: changing the type of a station to a more cheap/expensive one, reconnecting a client, removing a base station, adding a station, moving a base station. In order to avoid getting stuck in local optima during the tabu search, the algorithm is disabled to browse solutions from the tabu list. The novelty of the approach is that the tabu list is filled not with real decisions made in the past, but with operations to change the network configuration which can bring us back to old local optima. The essence of the modified multi-start algorithm is as follows: only two operations are used to obtain a new solutions (removing a base station and changing the type of a station to a cheaper one); only a part of the neighborhood is browsed; the transition to a new solution is performed on the "first improvement" principle; the algorithm of finding the best solutions runs several times. The developed algorithms are implemented in Delphi programming environment. It has been shown that the new algorithms show better results than the local search method. **Practical relevance:** The developed modifications of tabu search and multi-start methods help to find the solution for the base station location problem in a reasonable time, many orders of magnitude faster than the exact method of exhaustive search. It has been found that the quality of the problem solution obtained by probabilistic tabu search depends on the length of the tabu list and on the value of the neighborhood randomization parameter.

Keywords — Base Station Location, Multi-Start Algorithm, Tabu Search, Wireless Networks, Optimization, SIR.

References

1. Vishnevskii V. M. *Teoreticheskie osnovy proektirovaniia komp'iuternykh setei* [Theoretical Bases of Designing Computer Networks]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2003. 512 p. (In Russian).
2. Ermolaev S. I. Optimal Base Station Location. *Telecommunication Sciences*, 2010, vol. 1, no. 1, pp. 349–355 (In Russian).
3. St-Hilaire M., Chinnek J. W., Chamberland S., Pierre S. Efficient Solution of the 3G Network Planning Problem. *Computers & Industrial Engineering*, 2012, vol. 63, no. 4, pp. 819–830.
4. Arkhangel'skii A. I. *Programmirovaniie v Delphi 7* [Programming in Delphi 7]. Moscow, Binom-Press Publ., 2003. 1152 p. (In Russian).
5. Koskie S., Gajic Z. A Nash Game Algorithm for SIR-based Power Control in 3G Wireless CDMA Networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2005, vol. 13, no. 5, pp. 1017–1026.
6. Usmanova A. R. *Metod poiska s zapretami dlia zadach upakovki v konteinery*. Dis. kand. fiz.-mat. nauk [Tabu Search Method for Bin Packing Problem. PhD phys. and math. sci. diss.]. Ufa, 2002. 101 p. (In Russian).
7. Skakov E. S. Tabu Search for Solving Optimization Problems. *Trudy 15 Mezhdunarodnoi konferentsii "Novoe slovo v nauke i praktike: gipotezy i aprobatitsia rezul'tatov issledovaniia"* [Proc. 15th Int. Conf. "The New Word in Science and Practice: Hypotheses and Testing of the Results of Researches"]. Novosibirsk, 2015, pp. 166–171 (In Russian).
8. Glover F. Tabu Search. Part I. *ORSA Journal on Computing*, 1989, vol. 1, no. 3, pp. 190–206.
9. Glover F. Tabu Search. Part II. *ORSA Journal on Computing*, 1990, vol. 2, no. 1, pp. 4–32.
10. Luke S. *Essentials of Metaheuristics*. Lulu, 2013. 242 p.
11. Gendreau M., Potvin J. Y. *Handbook of Metaheuristics*. Springer, 2010. 669 p.
12. Brønmo G., Christiansen M., Fagerholt K., Nygreen B. A Multi-Start Local Search Heuristic for Ship Scheduling — a Computational Study. *Computers & Operations Research*, 2007, vol. 34, no. 3, pp. 900–917.
13. Martí R., Resende M. G. C., Ribeiro C. C. Multi-Start Methods for Combinatorial Optimization. *European Journal of Operational Research*, 2013, vol. 226, no. 1, pp. 1–8.
14. Rudnev A. S. Probabilistic Tabu Search Algorithm for the Packing Circles and Rectangles into the Strip. *Diskretnyi analiz i issledovanie operatsii*, 2009, vol. 16, no. 4, pp. 61–86 (In Russian).
15. Goncharov E. N., Kochetov I. A. Probabilistic Tabu Search for Discrete Unconstrained Optimization. *Diskretnyi analiz i issledovanie operatsii*, 2002, vol. 9, no. 2, pp. 13–30 (In Russian).
16. Kochetov I. A. *Metody lokal'nogo poiska dlia diskretnykh zadach razmeshcheniia*. Dis. dokt. fiz.-mat. nauk [Local Search Methods for Discrete Facility Location Problems. Dr. phys. and math. sci. diss.]. Novosibirsk, 2009. 267 p. (In Russian).
17. Goncharov E. N., Kochetov I. A. The Behavior of Probabilistic Greedy Algorithms for Multi-stage Facility Location Problem. *Diskretnyi analiz i issledovanie operatsii*, 1999, vol. 6, no. 1, pp. 12–32 (In Russian).

К статье А. В. Назарова, В. Л. Якимова, В. А. Авдеева «Алгоритм максимизации энтропии обучающей выборки и его использование при синтезе моделей прогноза дискретных состояний нелинейных динамических систем» (ИУС, 2015, № 2, с. 57–66).

На с. 58 формула (2) напечатана в следующем виде:

$$\bar{G} = -\bar{P}_{\text{ош}} = -\frac{1}{h_3} \sum_{h=1}^{h_3} P_{\text{ош } h}, \quad (2)$$

Следует читать

$$\bar{G} = 1 - \bar{P}_{\text{ош}} = 1 - \frac{1}{h_3} \sum_{h=1}^{h_3} P_{\text{ош } h}, \quad (2)$$

Редакция приносит извинения за допущенную ошибку.

UDC 543.2

doi:10.15217/issn1684-8853.2015.3.107

FEASIBILITY STUDY – VITAMIN D LOADING DETERMINATION BY FTIR-ATR

E. Simana^a, B.Sc., Electrical Engineering, eran.simana@gmail.com

R. Simian^a, B.Sc., Electrical Engineering, ronensimian@gmail.com

S. Portnoy^b, PhD, Biomedical Engineering, portnoys@tauex.tau.ac.il

A. Jaffe^c, M.D, PhD, Endocrinologist, jaffe@hy.health.gov.il

B. Z. Dekel^a, PhD, Electrical Engineering, benziond@ruppin.ac.il

^aRuppin Academic Center, Emek-Hefer, 40250, Israel

^bOccupation Therapy Department, Tel-Aviv University, Tel-Aviv, Israel

^cEndocrinology and Diabetes Unit, Hillel Yaffe Medical Center, Hadera, Israel

Purpose: The aim of the present study was to develop a simple and accurate way to measure vitamin D levels. Vitamin D nowadays is measured by a variety of methods which their common drawbacks are expensive equipment and the need for high trained technical staff. In this research we measured vitamin D levels by means of Fourier transform infra red method in conjugation with the evanescent wave spectroscopy technique, in order to develop a simpler vitamin D measurement method. **Methods:** Blood samples were collected from patients with vitamin D deficiency at five intervals before and up to 16 days after they took a dose of 200,000 IU vitamin D₃. Samples were measured by the conventional bio-chemical method and by the evanescent wave spectroscopy means. **Results:** Correlation was found between the vitamin D levels measured by the traditional method and by the evanescent wave spectroscopy technique. The absorption lines occurred prominently in the IR spectral regions of the Amide I ($\approx 1650\text{ cm}^{-1}$), Amide II ($\approx 1530\text{ cm}^{-1}$) and the ($\approx 3400\text{ cm}^{-1}$) absorption band which is attributed to the hydroxyl group indicated by the O-H stretch. In addition, the examination of the blood samples using the evanescent wave spectroscopy with clustering techniques facilitated the discrimination between vitamin D deficiency and normal vitamin D levels. **Practical relevance:** This study demonstrates the potential of using the Fourier transform infra red method in conjugation with the evanescent wave spectroscopy technique coupled with multivariate analysis as a non-expensive, rapid and accurate alternative to the routine methodologies.

Keywords – FTIR-ATR Spectroscopy, Mid Infrared, Vitamin D.

Introduction

It has been well-known for decades that vitamin D is activated in the skin by ultraviolet B radiation and that its main activities are calcium balance by affecting calcium absorption, secretion, bone metabolism and control of PTH. Although, how much vitamin D is produced in the body under given ultraviolet B exposure conditions is still discussed [1]. In the last decade, it has been suggested that vitamin D plays an important role in various diseases, e.g. osteoporosis, rickets, diabetes mellitus, cardiovascular disease, multiple sclerosis, different forms of cancer and a number of mental disorders, including depression [2].

Vitamin D exists in two main physiological forms [3], vitamin D₂ and vitamin D₃, which are hydroxylated by liver enzymes into 25-hydroxyvitamin D₂ (25(OH)D₂) and 25-hydroxyvitamin D₃ (25(OH)D₃), respectively. Their level in plasma is considered the best indicator of physiological vitamin D status.

Current health systems make daily use of several analytical methods which are usually applied to measure 25(OH)D. Among which are the radioimmunoassay method, the LIASONE which is an automated antibody and microparticle-based chemiluminescent immunoassay method, the high performance liquid chromatography and recently the liquid chromatography tandem mass spectrometry

method which is accepted as the reference method of choice for 25(OH)D determination. The main drawbacks to radioimmunoassay are the expense and hazards of preparing and handling the radioactive antigen, and the requirement of specially trained personnel and labs. The chromatography techniques also require expensive equipment and a great deal of technical experience. The above drawbacks increase in third world countries.

Hence, there is great need for a fast, low-cost, safe, simple and accurate method for measuring vitamin D or at least one that will indicate vitamin D status as normal, low level or severely deficient.

In recent decades, fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy with or without attenuated total reflection (ATR) accessory, is a field that has undergone significant development for its utilization as a simple, reproducible, accurate diagnosis tool [4] in which nondestructive and minimum sample preparation is required. In addition, these techniques provide molecular-level information allowing investigation of functional groups, bonding types, and molecular conformations. Spectral bands in vibrational spectra are specific and provide direct information about the biochemical composition [5].

Fourier transform infrared has also been applied in a variety of medical fields, e.g. hematology [6], and diseases of various organs, e.g. laryngeal

cancer [7], colorectal cancer [8], lung cancer [9], liver cancer [10], and many others. Furthermore, FTIR spectral analysis has been used to characterize proteins [11], nucleic acids [12] and a variety of diseases by locating their spectral fingerprint [13] in the infrared spectrum. FTIR technique has also been applied in the detection of low level quantities (in the range of 50 ng/ml), of the hormone progesterone at levels of 17 to 76 ng/ml by recognizing the functional groups of ketone, methyl and methylketone at 1724, 1375 and 1354 cm^{-1} wavenumbers respectively [14]. Furthermore, spatially resolved FTIR spectroscopy of single oral mucosa cells has also been investigated [15]. FTIR technique has been used to measure low level concentrations of materials in air, like ethene which was obtained with a limit of detection of 1.1 ppb (in the range of 1 ng/ml) in air samples in the Austrian Alps [16].

Vitamin D has characteristic absorption spectra in the mid-IR range 3–30 μm , due to the excitation of fundamental rotational and vibrational transitions in this spectral range [17]. Therefore, simple and reliable optical sensing methods, such as mid-IR evanescent wave spectroscopy, can be used for their detection. This method is of particular interest due to its intrinsic molecular specificity, robustness and the possibility to deal with liquids such as blood which have a very high absorption in the mid-IR. ATR spectroscopy has long been used as a method for chemical and biological analysis [18]. The method is based on the principle of optical absorption of an evanescent wave outside a waveguide. When light is totally internally reflected in a waveguide there is an evanescent wave that decays exponentially outside the waveguide over a distance of a few wavelengths. If a liquid like plasma blood is placed on the waveguide, the evanescent wave may be partially or totally absorbed and the transmission through the waveguide is reduced. This will occur at specific wavelengths that correspond to the absorption peaks of the sample. Therefore, by measuring the transmission of the waveguide, at different wavelengths, one is actually measuring the absorption spectrum of the sample.

The main purpose of this study was to employ FTIR-ATR spectroscopy to determine vitamin D values several times before and during 16 days after a loading of 200,000 IU vitamin D₃ was taken. This intra-subject study design was chosen since it eliminates unique physiological features specific to each subject and enhances the vitamin D measurement reliability.

Materials and Methods

In this study, 11 healthy subjects (mean and SD age (36±13) years old) with vitamin D deficiency (mean and SD (17.5±3.4) ng/ml) participated. Each

subject read and signed an informed consent form pretrial, approved by the hospital Helsinki committee. For each patient a venous blood sample was taken five times (Helsinki no. 009-13-HYMC and NIH no. NIC01770262). Plasma was obtained by centrifugation of whole blood and stored at -20 °C before further analysis. The first blood sample was taken before the patient swallowed a dose of 200,000 IU of vitamin D₃. Then blood samples were taken at 4 hours, 24 hours, 48 hours and 16 days after the loading. Each plasma blood sample 10 ml was divided equally into two samples. 5 ml of the sample was transferred to the biochemical laboratory in order to measure the vitamin D level by the LIAISON 25 OH vitamin D total Assay (DiaSorin Inc., USA). The second 5 ml sample was transferred to the electro-optical laboratory for Mid-IR examination. For analysis, the frozen plasma samples were thawed at room temperature for 60 min. Each specimen was transferred to the IR-spectrometer and a spectrum was obtained.

An Oriel MIR 8025 FTIR spectrometer with PIKE HATR attachment containing a Zinc Selenide (ZnSe) crystal was used to acquire IR-spectra (8 cm^{-1} spectral resolution within the 5000–1000 cm^{-1} region, co-added for 100 scans). Prior to use and between each specimen, the ATR crystal was washed with ethanol and dried with tissue paper. In addition, background and saline absorption spectra were also taken prior to the examination of each new specimen. Spectra were analyzed for baseline correction, smoothing and converted into absorbance by eFTIR software (Essential FTIR™).

Raw spectra were processed employing principal components analysis (PCA) principal coordinates analysis (PCoA) and linear discriminant analysis (LDA) using the PAST software package (University of Oslo, Norway). Grouping of spectra into clusters and the extent to which these clusters correspond to classes of the sample was calculated. PCA and PCoA are based on the assumption that variation implies information: it replaces the original wavenumbers between 1000 to 5000 cm^{-1} with just a very few significant or principal components. Each plasma blood spectrum obtained, is replaced by a “score”; thus in a scores plot, each set of measurements (spectrum) appears as a single point in n-dimensional space. PCA and PCoA allow one to distinguish between vitamin D levels.

Principal components analysis was also used for data reduction and processing of the output using LDA. In LDA, new variables are found such that the ratio of the between-cluster variance to the within-cluster variance is maximized, so that the clusters display maximum separation. LDA also allows the choice of predetermined classes to be taken into account during the derivation of clusters.

Results and Discussion

Vitamin D levels

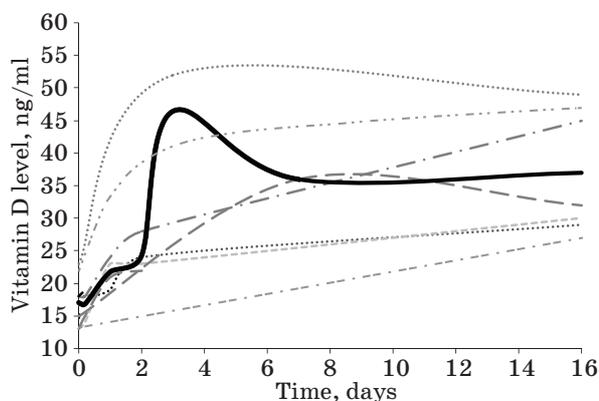
Total vitamin D during the 16 days after the loading, was determined by the LIAISON 25, using chemiluminescent immunoassay technology. During the first days following the loading, total vitamin D levels were rising (Fig. 1); however, from the end of week 1, values were monotonically decreasing, as has been shown in previous studies [19].

Infrared spectrums of blood plasma samples

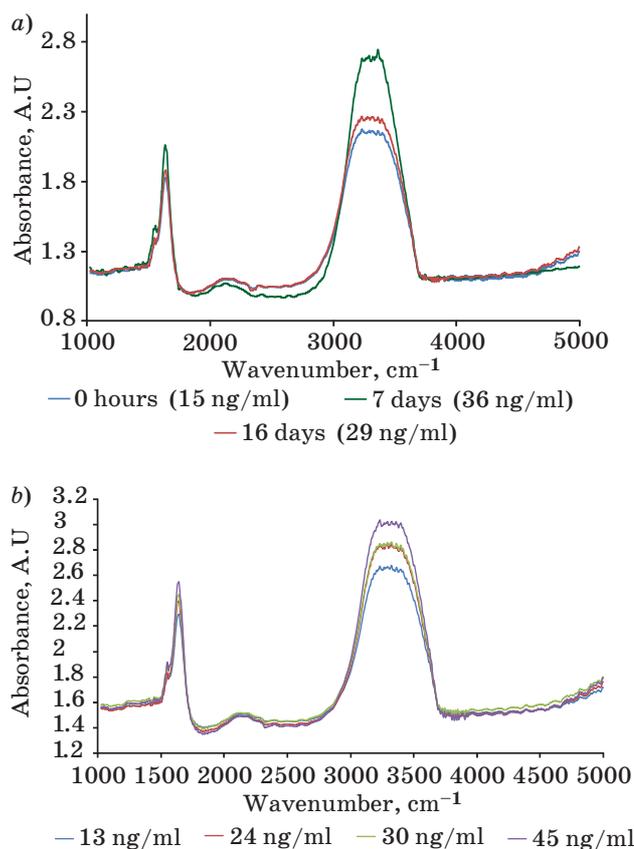
Infrared spectra were taken for all plasma blood samples of the subjects. Fig. 2, *a* shows the spectra of a representative subject (male, age 50 years old, vitamin D levels at the time of recruitment 15 ng/ml) of a set of blood plasma samples after saline subtraction. This set is for spectra taken before the vitamin D₃ loading, 7 days and 16 days post loading.

The vitamin D levels as measured by the LIAISON 25 system were 15 ng/ml at 0 hours, 32 ng/ml at 7 days and 36 ng/ml after 16 days, respectively. It can be seen that spectral differences between plasma samples concern mainly the wavenumber range of the Amide I and II at 1550 and 1640 cm⁻¹ and the (3300 to 3400 cm⁻¹) absorption band which is attributed to the hydroxyl group indicated by the O-H stretch. This strong absorption band of the OH group compared to the other relative strength of the absorbance of the vitamin D spectrum is most likely attributable to an alcohol group in the molecule [20]. The spectral line at 3300 cm⁻¹ has similarly been attributed to vitamin D in the literature [21]. The set in Fig. 2, *b* is for spectra taken during the 16 days after loading from a variety of subjects with vitamin D range from 13 to 45 ng/ml.

This demonstrates the same behavior as was shown in Fig. 2, *a*: as vitamin D levels increase,



■ Fig. 1. Vitamin D levels vs. time after oral vitamin D₃ loading. The solid line represents the average of all patients, while the dashed and dotted lines represent individual patient samples



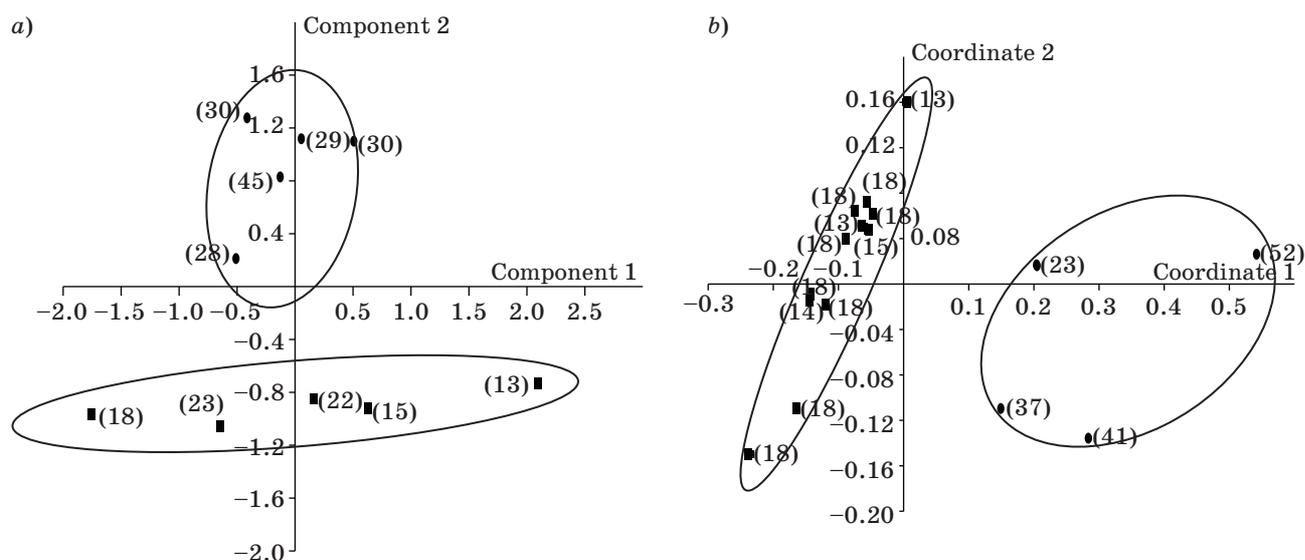
■ Fig. 2. Infrared spectrum of blood plasma with various values of vitamin D levels of a single subject (*a*) and for four different subjects (*b*)

absorption lines in the ranges 1550, 1640 and 3300 cm⁻¹ increase respectively.

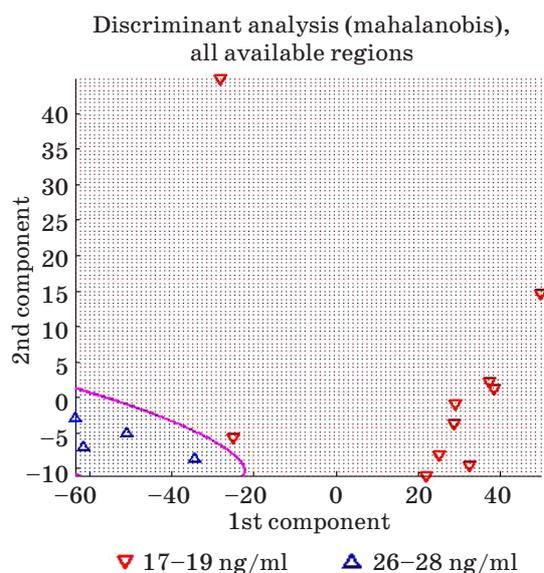
PCA/PCoA-LDA analysis of blood plasma samples

Although visual differences in spectral peak intensities and/or positions were not observed markedly between spectra for different vitamin D levels, small differences were noted throughout the 1600 and the 3300 cm⁻¹ range, as seen in Fig. 2. These spectral differences were exploited for tissue classification with the multivariate statistical techniques of PCA/LDA. In Fig 3, *a* and *b* a good separation was observed between two classes of vitamin D levels, as the “low” level (vitamin D deficiency) is in the range of 20 ng/ml and the “high” level (normal vitamin D values) is in the range of 30 ng/ml.

We analyzed spectra in the region of 1000 to 5000 cm⁻¹ using LDA for the differences between two vitamin D levels (the low level (vitamin D deficiency) was less than 20 ng/ml and the high level (normal vitamin D levels) was above 26 ng/ml). As shown in Fig. 4, PCA-LDA provides clearer clustering and separation between these two vitamin D levels.



■ Fig. 3. PCA (a) and PCoA (b) scores plot, classed by vitamin D levels shown in parentheses. Class I: levels below 23 ng/ml and Class II: levels between 28 to 45 ng/ml



■ Fig. 4. LDA scores plots, classed by “low” — vitamin D deficiency levels and “high” — normal vitamin D levels

Conclusions

This preliminary study shows that measuring the mid-IR spectrum of plasma blood using FTIR/ATR spectroscopy technique creates a simple, direct and rapid quantitative analysis method for vitamin D levels.

Our results show that vitamin D levels can be assigned specifically to spectral bands of the Amide I and II and the O-H stretch at 3400 cm^{-1} ; clustering analysis with PCA/PCoA-LDA facilitated the identification of and the discrimination between various vitamin D₃ 25OH levels.

Although, our sampling data is small, we can conclude that the Mid-IR spectral method for the determination of vitamin D₃ 25OH is a feasible method that has the advantage of being simple, non-expensive, unshazardous, and accurate, so that it can be an alternative to the methods currently in use. Further studies are needed to verify these findings.

References

1. Meinhardt M., and Krebs R. A Computational Model for Previtamin D₃ Production in Skin. *Photochemical and Photobiological Sciences*, 2012, vol. 11, pp. 731–737.
2. Rosen C. J., Adams J. S., Bikle D. D., et al. The Non Skeletal Effects of Vitamin D: an Endocrine Society Scientific Statement. *Endocrine Reviews*, 2012, vol. 33, pp. 456–492.
3. Hymoller L., Jensen S. K. Vitamin D Analysis in Plasma by High Performance Liquid Chromatography (HPLC) with C30 Reversed Phase Column and UV Detection – Easy and Acetonitrile-free. *Journal of Chromatography A*, 2011, vol. 1218, pp. 1835–1841.
4. Diem M., Chiriboga L., Lasch P., and Pacifico A. IR Spectra and IR Spectral Maps of Individual Normal and Cancerous Cells. *Biopolymers (Biospectroscopy)*, 2002, vol. 67, pp. 349–353.
5. Movasaghi Z., Rehman S., and Rehman I. Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy of Biological Tissues. *Applied Spectroscopy Reviews*, 2008, vol. 43, pp. 134–179.
6. Liu K. Z., Shi M. H., and Mantsch H. H. Molecular and Chemical Characterization of Blood Cells by Infrared Spectroscopy: A New Optical Tool in Hematology.

- Blood Cells, Molecules, and Diseases*, 2005, vol. 35, pp. 404–412.
7. **Menzies G. E., Fox H. R., Marnane C., Pope L., Prabhu V., Winter S., Derrick A. V., and Lewis P. D.** Fourier Transform Infrared for Noninvasive Optical Diagnosis of Oral, Oropharyngeal, and Laryngeal Cancer. *Translational Research*, 2014, vol. 163, pp. 19–26.
 8. **Dong L., Sun X., Chao Z., Zhang S., Zheng J., Gurrung R., Du J., Shi J., Xu Y., Zhang Y., and Wub J.** Evaluation of FTIR Spectroscopy as Diagnostic Tool for Colorectal Cancer using Spectral Analysis. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2014, vol. 122, pp. 288–294.
 9. **Wanga X., Shen X., Sheng D., Chen X., and Liu X.** FTIR Spectroscopic Comparison of Serum from Lung Cancer Patients and healthy Persons. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2014, vol. 122, pp. 193–197.
 10. **Thumanu K., Sangrajang S., Khuhaprema T., Kallalak A., Tanthanuch W., Pongpiachan S., and Heraud P.** Diagnosis of Liver Cancer from Blood Sera Using FTIR microspectroscopy: a Preliminary Study. *Journal of Biophotonics*, 2014, vol. 7, pp. 222–231.
 11. **Haris P. I., and Severcan F.** FTIR Spectroscopic Characterization of Protein Structure in Aqueous and non-Aqueous Media. *Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic*, 1999, vol. 7, pp. 207–221.
 12. **Banyaya M., Sarkarb M., and Graslunda A.** A Library of IR bands of Nucleic Acids in Solution. *Biophysical Chemistry*, 2003, vol. 104, pp. 477–488.
 13. **Ellis D. I., and Goodacre R.** Metabolic Fingerprinting in Disease Diagnosis: Biomedical Applications of Infrared and Raman Spectroscopy, *Analyst*, 2006, Vol. 131, pp. 875–885.
 14. **Sjahfirdi L., Septian A., Maheshwari H., Astuti P., Suyatna F. D., and Nasikin M.** Determination of Estrous Period in Female Rats by FTIR Spectroscopy through Identification of Reproductive Hormone in Blood Samples. *World Applied Sciences Journal*, 2011, vol. 14, pp. 539–545.
 15. **Lasch P., Boese M., Pacifico A., and Diem M.** FT-IR Spectroscopic Investigations of Single Cells on the Subcellular Level. *Vibrational Spectroscopy*, 2002, vol. 28, pp. 147–157.
 16. **Smidt S., Bauer H., Pogodina O., and Puxbaum H.** Concentrations of Ethene and Formaldehyde at a Valley and a Mountain Top Site in the Austrian Alps. *Atmospheric Environment*, 2005, vol. 39, pp. 4087–409.
 17. **Jean J., Turcotte C., Simard R. E., and Fliss I.** Production and Characterization of Polyclonal Antibodies against Cholecalciferol (Vitamin D3). *Journal of Immunological Methods*, 1999, vol. 223, pp. 155–163.
 18. **Harrick N. J.** *Internal Reflection Spectroscopy*. Harrick Scientific Corporation, 1987. 327 p.
 19. **Armas L. A. G., Hollis B. W., and Heaney R. P.** Vitamin D2 is Much Less Effective than Vitamin D3 in Humans. *The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism*, 2004, vol. 89, pp. 5387–5391.
 20. **King J. M., and Min D. B.** Riboflavin-Photosensitized Singlet Oxygen Oxidation Product of Vitamin D2. *JAOCs*, 2002, vol. 79, pp. 983–987.
 21. **Feldman D., Pike J. W., and Adams J. S.** *Vitamin D*. 3rd ed. Academic Press, 2011. Vol. 1. 2083 p.

КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ПОДХОДЫ К ФОРМИРОВАНИЮ СТРАТЕГИИ РАЗВИТИЯ ГОРНОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА МЕСТНОГО ЗНАЧЕНИЯ

Г. Ю. Пешкова^а, канд. экон. наук, доцент

^аСанкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия

Введение: на настоящее время практически не существует региональных программ стратегического развития горнопромышленных комплексов местного значения, к которым относятся в основном производства по добыче общераспространенных видов полезных ископаемых: строительных камней, песка, песчано-гравийных материалов, торфа и т. п., — которые крайне важны для экономики региона и, прежде всего, для строительного и аграрного сектора, малой энергетики. **Цель исследования:** разработка концептуальной схемы формирования стратегии развития горнопромышленного комплекса регионального значения с выделением стратегических программ развития по видам полезных ископаемых. **Результаты:** исследования определили специфические проблемы развития горнопромышленного комплекса, добывающего общераспространенные виды полезных ископаемых, к которым относятся ориентация на внутренние рынки и практически полное отсутствие возможности выхода на внешние рынки, невысокая инвестиционная привлекательность, низкий уровень использования производственных мощностей. Установлено, что данные проблемы имеют системный характер и требуют совершенствования концептуальных принципов в части формирования стратегии развития горнопромышленного комплекса регионального значения. На основании выявленных проблем в сферах воспроизводства ресурсов, инновационной и инвестиционной политик, экологии определены для горнопромышленного комплекса, добывающего минеральное сырье местного значения, приоритетные стратегические направления развития: максимальное использование существующего природно-сырьевого потенциала; инновационное технологическое развитие добывающих производств; поиск возможностей диверсификации производств; активное использование техногенных отходов (пески-отсевы); развитие интеграционных механизмов горного бизнеса и государства. **Практическая значимость:** результаты исследования могут быть использованы департаментами промышленности и недропользования при формировании приоритетов развития и стратегических программ развития отраслей горнопромышленного комплекса регионального значения.

Ключевые слова — горнопромышленный комплекс, стратегия развития, государственное регулирование, регион, местные полезные ископаемые, программный подход.

Введение

Горнопромышленный комплекс (ГПК), функционирующий в регионах «негорнопромышленного» типа экономики, представлен, как правило, предприятиями, добывающими общераспространенные полезные ископаемые. К ним, в частности, относятся пески, песчано-гравийное сырье, строительный камень, облицовочный камень, торф. Кроме того, в минерально-сырьевом комплексе (МСК) регионов большую роль могут играть такие полезные ископаемые, как доломиты, глины, известняк. Перечисленные полезные ископаемые часто называют полезными ископаемыми местного значения. Общераспространенные полезные ископаемые играют существенную роль при реализации проектов промышленного, дорожного и гражданского строительства. Ленинградская область, Московская область, большая часть регионов Центрального федерального округа и др. относятся к регионам «негорнопромышленного» типа экономики. ГПК на таких территориях, как правило, не приносит основную часть доходов бюджета региона, но играет значимую роль во многих сферах промышленности, строительства, жилищно-коммунального хозяйства. Также

ГПК местного значения способен обеспечивать сбалансированное развитие базовых экономических комплексов — топливно-энергетического, металлургического, агропромышленного, химического, строительного, создания продуктов высоких технологий и др.

В условиях устойчивого функционирования региональной экономики продукция предприятий, добывающих полезные ископаемые местного значения, будет всегда востребована.

Необходимо отметить тот факт, что проработанность стратегических целевых программ развития подотраслей ГПК на уровне региона крайне низкая. Стратегическое программирование является необходимым атрибутом устойчивого функционирования ГПК местного значения, такие целевые программы могут быть сформированы для каждого вида полезных ископаемых. В этой связи со стороны региональных властей требуется проведение целенаправленной политики, способствующей формированию стратегии развития ГПК местного значения, и разработка комплекса мероприятий, стимулирующих недропользователей к модернизации добывающих производств, отвечающих современным потребностям экономики региона.

Проблемы региональных программ стратегического развития

Основная проблема развития ГПК регионального значения – это ориентация на внутренние рынки и практически полное отсутствие возможности выхода на внешние рынки. Для многих горных компаний характерны невысокая инвестиционная привлекательность, низкий уровень использования производственных мощностей, высокий физический и моральный износ производственных фондов.

Особая роль ГПК местного значения обуславливает целесообразность а) исследования проблем взаимодействия добывающих отраслей с остальными отраслями промышленности, агропромышленным комплексом, транспортом и б) разработки концепции инновационного развития отрасли в целях ее стабилизации в ближайшей перспективе и создания условий для экономического роста в долгосрочной перспективе.

Низкая рентабельность проектов, относительно узкие рынки сбыта и возможности реализации традиционной продукции диктуют необходимость инновационного развития ГПК и диверсификации производства. Так, например, торф, помимо традиционной — топливной — промышленности, может широко применяться и в других отраслях. Торф и продукция на его основе используются в качестве субстратов и органических удобрений в растениеводстве; сырья для химии и термехимии; подстилки и пищевых добавок в животноводстве; торфяных тканей и торфодерновых ковров; фильтрующего, сорбционного, изоляционного, строительного материала; материала для биофильтрации и др.

Необходимо отметить, что современный этап развития МСК, функционирующего в регионе «негорнопромышленного» типа, напрямую связан с крупномасштабным строительством на территории региона федеральных и областных объектов транспортной инфраструктуры. Продукция МСК в таких регионах будет востребована в перспективе, поэтому со стороны региональных властей требуется разработка долгосрочных программ, стимулирующих недропользователей к инновационному развитию добывающего производства и способствующих организации выпуска продукции, отвечающей рыночным потребностям экономики региона [1].

В основу разработки концепции сбалансированного развития ГПК местного значения должен быть заложен всесторонний учет горнотехнических и экономических особенностей отрасли и ее тесные интеграционные взаимосвязи с другими специализирующими отраслями промышленности региона. При разработке стратегии развития ГПК целесообразно задействовать инновацион-

ный и имеющийся производственно-технический потенциал, внутриотраслевые резервы. Также следует оценить развитие внутренних рынков и необходимость реанимации обрабатывающих производств, проблемы интенсификации инфраструктурных проектов [1, 2].

Отсутствие комплексных целевых программ устойчивого развития ГПК, добывающих сырье местного значения и ориентирующихся на локальные рынки, приводит к тому, что не развивается альтернативная энергетика и нетрадиционное использование некоторых видов сырья. В качестве примера можно привести торфяную и сланцевую промышленность Ленинградской области:

— более 600 месторождений торфа в нераспределенном фонде недр, огромное количество заброшенных месторождений, нулевая инвестиционная привлекательность;

— закрытие шахт по добыче горючего сланца и, как следствие, экономическая стагнация территории, отток рабочей силы, потеря потенциальных доходов и др.

В целом Ленинградская область представляет собой территорию с относительно развитой горнодобывающей инфраструктурой. Современная минерально-сырьевая база области включает в себя 397 месторождений твердых полезных ископаемых, учтенных государственным балансом запасов. На базе выявленных месторождений твердых полезных ископаемых действует свыше 160 карьеров и более 150 предприятий по производству строительных материалов. Из добываемого сырья производятся и могут производиться: глинозем, минеральные удобрения, горючие сланцы, цемент, асбесто-цементные изделия, кирпич, стеновые материалы, плитки керамические, глазурованные, фасадные и половые, щебень, гравий, песок строительный, керамзит, порошок глины, известковая мука, разнообразные каменные изделия из изверженных и метаморфических пород, силикатные материалы, стекло, различная сельхозпродукция из торфа и сапропеля [3, 4].

В настоящее время имеются проблемы стратегического программирования на уровне регионов и отраслей. Существующие программы, как правило, не позволяют системно и целенаправленно развивать сырьевую базу таких полезных ископаемых, которые не принесут сверхдоходов (в отличие от нефти или природного газа). Также необходимо понимание взаимосвязи процессов освоения местных полезных ископаемых, технологического развития горных производств и обеспечения устойчивости в социальной сфере. Формирование стратегических программ по развитию ГПК, добывающего общераспространенные полезные ископаемые, и их реализация должны обеспечить стабильные поступления в региональный бюджет. Кроме того, мероприя-

тия, заложенные в программы, позволят создать новые производства и рабочие места, оживить малый горный бизнес, активизировать инновационный бизнес.

Стратегия развития ГПК, функционирующего в регионе «негорнопромышленного» типа, должна сформировать универсальные методические подходы к стратегическому программированию территориального развития, обеспечить рациональное использование местных сырьевых активов, а также позволить достичь устойчивого развития ряда проектов в базовых отраслях промышленности региона и модернизации инфраструктуры.

Разработка стратегии сбалансированного развития

Порядок разработки стратегии сбалансированного развития ГПК, добывающего местные полезные ископаемые и функционирующего в регионе «негорнопромышленного типа», представлен на рисунке.

Стратегический анализ является одним из способов выработки направлений развития ГПК путем установления разрыва между стратегическими целями и возможностями их достижения, обусловленными реальным производственно-экономическим потенциалом хозяйствующих субъектов.

Стратегический анализ проводится в рамках следующих блоков: идентификация объектов и субъектов стратегического анализа, анализ внешней и внутренней среды, сопоставление экономических интересов компаний, региона, государства и прочих заинтересованных групп. Во многом интересы компаний, добывающих общераспространенные полезные ископаемые, связаны с реализацией крупных проектов по строительству дорог федерального значения.

Объектом анализа является минерально-сырьевая база рассматриваемого региона и производственные возможности горных компаний, управленческий и трудовой потенциал. Субъектами, определяющими стратегию развития ГПК региона, являются региональные структуры управления в сфере недропользования и промышленной политики, горнодобывающие и перерабатывающие предприятия региона, инвесторы, предприятия базовых отраслей региональной экономики, экологические и общественные организации, население.

Уточняя процесс разработки стратегии развития ГПК местного значения, целесообразно изучить ряд аспектов, влияющих на качественную проработку стратегических программ, и провести ряд мероприятий, к которым, в частности, относятся:

- анализ инновационных, экономических, экологических и социальных процессов и тенденций в развитии экономики региона в целом и ГПК региона в ретроспективе 10–15 лет;

- выявление меры влияния на будущее развитие инерционных, дестабилизирующих факторов и тенденций, берущих начало в предшествующем периоде;

- анализ особенностей минерально-сырьевого потенциала региона с выявлением диспропорций в воспроизводстве запасов полезных ископаемых;

- детализированный прогноз потребности рынка в продукции добывающих производств с выявлением новых рынков и областей расширения масштабов потребления продукции в перспективе;

- оценка возможностей получения новых видов продукции (ранее либо невостребованных, либо технологически невозможных) из добытого сырья;

- анализ возможностей рационального комплексного использования минерально-сырьевых ресурсов региона и групп месторождений;

- оценка потенциала энергоэффективности горных производств;

- исследование возможностей масштабного использования техногенных отходов производства;

- изучение возможностей использования институтов государственно-частных партнерств и механизмов краудсорсинга при формировании отраслевых стратегий;

- оценка бюджетной эффективности стратегических программ развития подотраслей ГПК с определением сопряженных и косвенных эффектов, возникающих при освоении минерально-сырьевой базы, и роста объемов добычи;

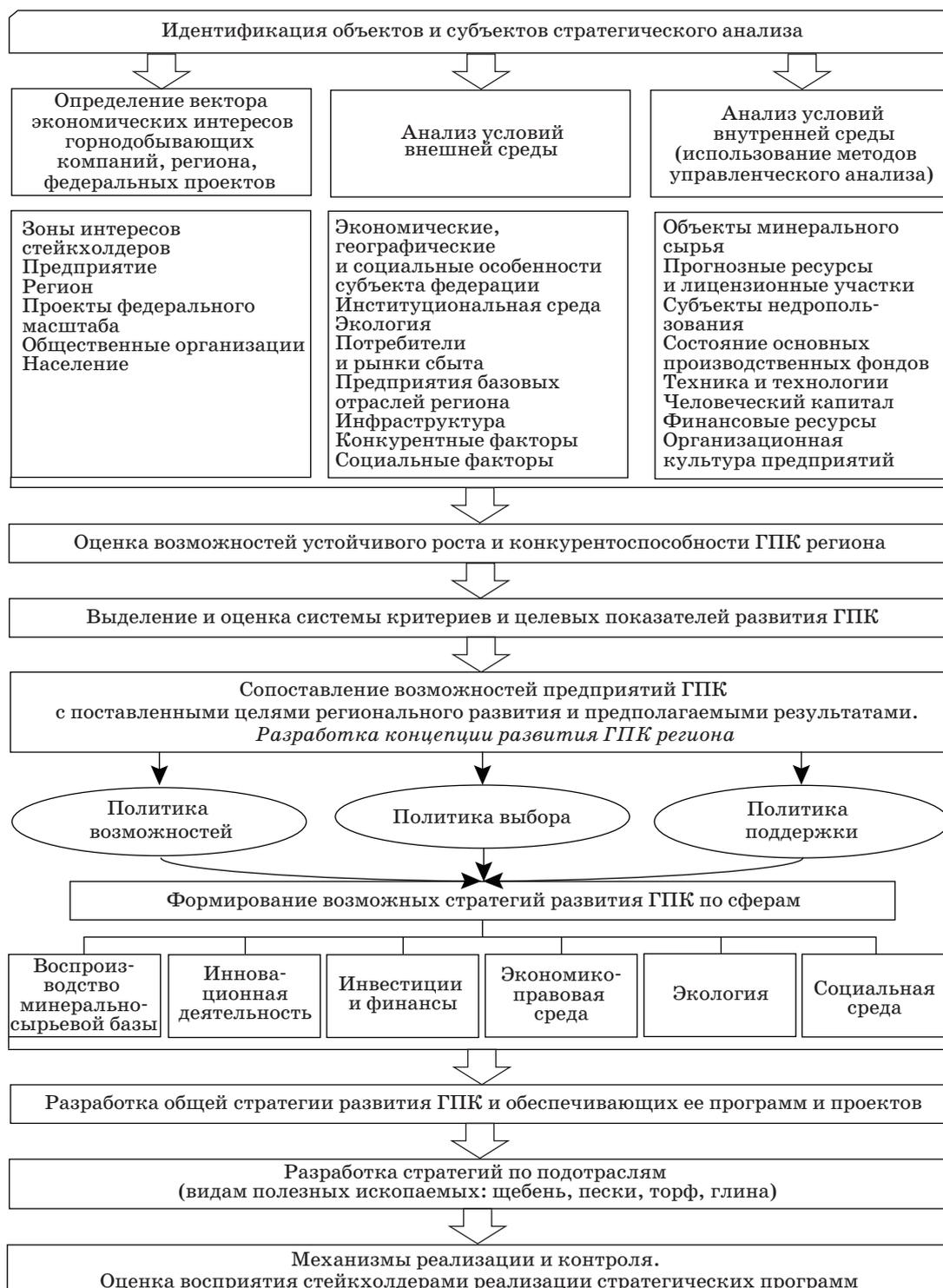
- оценка степени влияния общественных и природоохранных организаций, а также местного населения на реализацию стратегических программ.

В последнее время при разработке стратегических планов социально-экономического развития территорий используются механизмы обратной связи, которые основываются на мнениях независимых экспертов и населения. Такие методы называют краудсорсингом, их можно применять и при создании отраслевых стратегических программ с привлечением к участию в процессе их формирования недропользователей, экологических организаций, специалистов, местное население.

В целом качество стратегического планирования и программирования может существенно улучшиться при применении механизмов краудсорсинга.

Стратегический анализ отрасли по добыче общераспространенных полезных ископаемых позволил определить приоритетные направления развития ГПК местного значения, к которым относятся:

- поиск и освоение новых месторождений;



■ Порядок разработки стратегии развития ГПК, добывающего полезные ископаемые местного значения

- максимальное использование существующего природно-сырьевого потенциала;
- инновационное технологическое развитие добывающих производств;
- поиск возможностей диверсификации производств;

- вовлечение в промышленный оборот техногенных отходов (пески-отсевы);
- развитие интеграционных механизмов горного бизнеса и государства;
- активизация деятельности на региональных рынках.

Заключение

Развитие институциональной среды, способствующей сбалансированному развитию ГПК региона, должно быть ориентировано на совершенствование регионального инвестиционного законодательства и нормативно-правовой базы

Литература

1. Череповицын А. Е., Синьков Л. С., Смирнова Н. В. Концепция инновационной стратегии развития минерально-сырьевого комплекса негорнопромышленного региона (на примере Ленинградской области) // Вестник ЦКР Роснедра. 2011. № 3. С. 32–37.
2. Череповицын А. Е., Ильинова А. А. Горнопромышленные кластеры конкурентоспособности как основа инновационного развития экономики региона // Север и рынок: формирование экономического порядка. 2011. № 2(28). С. 136–139.
3. О проекте областного закона «О признании утратившим силу областного закона «О региональной целевой программе "Развитие и использование ми-

нерально-сырьевой базы Ленинградской области в 2006–2010 годах»; совершенствование методов и инструментов стратегического программирования; стимулирование инновационной деятельности; формирование внебюджетного инвестиционного фонда на основе отчислений в этот фонд определенной доли выручки от реализации продукции; стимулирование налогообложения.

нерально-сырьевой базы Ленинградской области в 2006–2010 годах», утверждении долгосрочной целевой программы «Развитие и использование минерально-сырьевой базы Ленинградской области в 2009–2010 годах» и внесении изменения в Постановление Правительства Ленинградской области от 31 августа 2007 года № 224». <http://zaki.ru/> (дата обращения: 20.04.2015).

4. Постановление Правительства Ленинградской области от 22.07.2011 № 231 «О долгосрочной целевой программе «Развитие и использование минерально-сырьевой базы Ленинградской области в 2011–2015 годах»». <http://lenobl.ru/Files/file/20110722%20231.pdf> (дата обращения: 20.04.2015).

UDC 338.242

doi:10.15217/issn1684-8853.2015.3.112

Conceptual Approaches to forming Local Mining Industry Development Strategy

G. U. Peshkova^a, PhD, Econ., Associate Professor, pgu@guap.ru

^aSaint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaya St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation

Purpose: At the moment, local mining complexes lack regional programs of strategic development. This is especially true for the production of construction stones, sand, sand-gravel materials, peat, etc. They are extremely important for the regional economies, especially for construction, agriculture and small-scale power generation. Efficient government policy in the mining industry and its innovative development should provide steady factors of support and growth. The goal of this research is developing a conceptual strategic framework for the formation of a regional mining complex with allocated strategic programs for particular types of minerals. **Results:** The researches defined specific problems of the mining complex extracting common useful minerals, such as: focusing on the domestic markets and the almost complete absence of access to external markets, low investment attractiveness, low level of capacity utilization. There has been established that these problems have system character and demand improvement of the conceptual principles of strategy formation of regional mining complex. On the basis of problems in areas of reproduction of resources, innovation and investment policies, environment, the researchers revealed the priority strategic directions of development of the mining complex extracting local common useful minerals, such as: maximum use of existing natural resources potential; innovative technological development of extractive industries; seeking opportunities for the diversification of industries; intensive use of industrial wastes (Sands-screenings); development of integration mechanisms of the mining business and the state. **Practical relevance:** The results of this research can be helpful for industrial and mining departments when choosing the development priorities and building strategic programs for regional mining complex branches.

Keywords — Mining Complex, Development Strategy, Governmental Regulation, Region, Local Minerals, Program Approach.

Reference

1. Cherepovitsyn A. E., Sin'kov L. S., Smirnova N. V. The Concept of Innovative Strategy of Development of Mineral Resources of non Mining Region (for Example the Leningrad Region). *Vestnik TsKR Rosnedra*, 2011, no. 3, pp. 32–37 (In Russian).
2. Cherepovitsyn A. E., Il'ina A. A. Mining Competitiveness Clusters as the Basis of Innovative Development of the Region's Economy. *Sever i rynek: formirovanie ekonomicheskogo poriadka*, 2011, no. 2(28), pp. 136–139 (In Russian).
3. *Postanovlenie Pravitel'stva Leningradskoi oblasti ot 30.09.2009 N 2992 «O proekte oblastnogo zakona "O priznanii utrativshim silu oblastnogo zakona "O regional'noi tselevoi programme "Razvitie i ispol'zovanie mineral'no-syr'evoi bazy Leningradskoi oblasti v 2006–2010 godakh", utverzhdenii dolgosrochnoi tselevoi programmy "Razvitie i ispol'zovanie mineral'no-syr'evoi bazy Leningradskoi oblasti v 2009–2010 godakh" i vnesenii izmeneniia v Postanovlenie Pravitel'stva Leningradskoi oblasti ot 31 avgusta 2007 goda N 224»* [About the Regional Law «On Invalidation Virtue of the Regional Law “On the Regional Target Program “The Development and Utilization of Mineral Resources Base Leningrad Region in 2006–2010”, Approved Long-Term Target Program “Development and use Mineral Resource Base of the Leningrad Region in 2009–2010” and Amending Regulation Government of the Leningrad Region August 31, 2007 N 224]. Available at: <http://zaki.ru/> (accessed 20 April 2015).
4. *Postanovlenie Pravitel'stva Leningradskoi oblasti ot 22.07.2011 N 231 «O dolgosrochnoi tselevoi programme "Razvitie i ispol'zovanie mineral'no-syr'evoi bazy Leningradskoi oblasti v 2011–2015 godakh"»* [Resolution of the Government of Leningrad Region from 22.07.2011 N 231 «On a Long-Term Target Program “Development and use of Mineral Resources Base of the Leningrad Region in 2011–2015”»]. Available at: <http://lenobl.ru/Files/file/20110722%20231.pdf> (accessed 20 April 2015).

УДК 65.012.12

doi:10.15217/issn1684-8853.2015.3.117

ОБ АЛГОРИТМЕ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ: ОТ АРХИТЕКТУРЫ РЕГИОНАЛЬНОЙ АВИАСЕТИ К ОПЦИОНАЛЬНОСТИ САМОЛЕТОВ (НА ПРИМЕРЕ КРАСНОЯРСКОГО КРАЯ)

С. В. Еремин^а, канд. техн. наук, министр транспорта^аМинистерство транспорта Красноярского края, Красноярск, РФ

Постановка проблемы: в отечественной авиации по-прежнему сохраняется устойчивая тенденция строительства самолетов, не учитывающая потребности населения регионов и рынка авиаперевозок. Вместе с тем базовым условием для формирования типов и опций региональных самолетов должна стать организованная на основании потребностей регионов архитектура авиасети. **Цель:** разработка алгоритма принятия решений, определяющего приоритетные (базовые) принципы формирования требований к региональным самолетам. **Результаты:** сформулированы требования к набору опций регионального самолета и на примере региональной авиации Красноярского края определены свойства отечественного самолета для региональной авиации: утилитарность, наличие многофункционального трансформированного грузопассажирского салона, минимальная механизация и упрощенная электроника, укороченный взлет/посадка. **Практическая значимость:** описанный алгоритм в условиях возрождающихся промышленных основ авиастроения разрешит более системно и максимально обоснованно сформировать типологию регионального самолета с набором опций, необходимых для обслуживания труднодоступных территорий государства. Это, в свою очередь, позволит избежать в дальнейшем сложной процедуры адаптации к местным условиям самолета, при разработке которого не учитывались особенности региональной авиасети.

Ключевые слова — региональная авиация, концепция развития, анализ процессов, системы управления.

Введение

Значению и проблемам развития регионального сообщения сегодня уделяется большое внимание на всех уровнях, что доказывает остроту данного вопроса.

В начале 1990-х гг. региональная авиация сократила объемы перевозок более чем в 6 раз по сравнению с данными советского периода и находится в таком положении уже более двух десятков лет.

Постепенно межрегиональная авиация стала получать поддержку на федеральном уровне, а вот за местную авиацию ответственность полностью несут регионы. При этом региональные власти в связи с ограниченностью финансового ресурса обеспечивают минимальные потребности населения региона в авиасообщении, не предусматривая меры стимулирования к повышению качества авиаперевозок.

С 2011 г. действуют федеральные программы стимулирования перевозок и приобретения современной авиатехники. Это, конечно, дало импульс к развитию региональной авиации. Если до 2011 г. сегмент местных перевозок стагнировал на фоне динамики авиаперевозок в целом, то уже с 2012 г. в нем резко возросла инвестиционная активность и динамика объемов работ.

Вместе с тем даже возросшее финансирование несопоставимо с потребностями для реновации фондов. По оценкам Федерального государствен-

ного унитарного предприятия «Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации», к 2020 г. отрасли потребуется до 400 региональных и 600 легких самолетов [1]. Этот сегмент и открывает основные возможности развития отечественной авиапромышленности. Решать эту стратегическую задачу должно только государство.

Переходя к рассмотрению тактики реализации вышеуказанной стратегии, необходимо акцентировать внимание на будущей архитектуре организации местного и регионального сообщений. Именно она должна предъявить производителям требования к тактико-техническим характеристикам новых воздушных судов (ВС).

Таким образом, алгоритм принятия решений должен быть основан на следующем принципе: формирование опций регионального и местного самолетов должно стать производной от результатов анализа архитектуры региональной и местной сети авиасообщений.

Красноярский край: авиасообщение сегодня

Сегмент региональных перевозок, представленный сегодня, в первую очередь, социально значимыми безальтернативными направлениями в северных и восточных регионах, в ближайшие годы столкнется с серьезными трудностями, обусловленными выбытием повсеместно исполь-

зуемой авиатехники советского производства в связи с истечением ее назначенного ресурса.

Красноярский край в данном случае не исключение. Протяженность края с севера на юг 2 500 км, 90 % территории относится к районам Крайнего Севера или приравненным к ним местностям, где практически отсутствуют круглогодичные наземные или водные пути сообщения. Очевидно, что на региональную и местную авиацию края ложится исключительная социальная нагрузка. Отметим, что протяженность большей части внутрирегиональных маршрутов достигает 1 500 км и более.

Сегодня из краевого бюджета на обеспечение пассажирской авиадоступности северных территорий тратится около 600 млн р. ежегодно [2]. Для сравнения: федеральные субсидии на развитие межрегионального сообщения в Сибирском федеральном округе в 2014 г. составили около 750 млн р.

Парк региональных и местных воздушных судов в крае, как и во многих соседних субъектах, представлен самолетами Ан-24/26 и вертолетами Ми-8Т. Средний возраст техники 25–30 лет, и стоимость поддержания ее летной годности с каждым годом растет, причем темпами, намного опережающими инфляцию.

С технической точки зрения простая реновация ВС с сохранением действующей системы организации перевозок вполне возможна. На рынке имеются современные отечественные и зарубежные аналоги — вертолеты Ми-171, самолеты АTR-42, Ан-140 и др. Проблема в другом — полная себестоимость летного часа современных самолетов класса Ан-24 и вертолетов класса Ми-8Т в 1,5–2 раза выше, чем устаревающих советских аналогов.

Экономический анализ позволяет сделать вывод: требуется поиск эффективных моделей организации авиасообщения.

Модели современной организации авиасообщения

В современных экономических условиях могут быть предложены два основных варианта модели организации авиасообщения.

Первая модель базируется на сохранении существующей системы организации регионально-социально значимого авиасообщения, но при этом в нее сознательно закладывается 3–4-кратный рост расходов бюджета на обеспечение доступности.

Вторая предполагает кардинальные изменения местного и регионального авиасообщения в целях минимизации бюджетной нагрузки и улучшения доступности регионального сообщения.

На основе выбранной второй модели интенсификации авиаперевозок в Красноярском крае разрабатывается концепция развития регионального авиатранспортного комплекса до 2030 г. Ее основа — максимально возможное внедрение современных легких самолетов. В первую очередь, необходимо на них заменить вертолеты Ми-8Т на местных перевозках, восстановив грунтовые посадочные площадки, существовавшие в советское время. Затраты на восстановление площадок за счет снижения себестоимости перевозок окупятся через 3–4 года. В рамках концепции за 6–7 лет запланировано восстановить всю сеть северных самолетных посадочных площадок (70 ед.).

Пересмотр подхода к авиаперевозкам на местных линиях — это первый шаг. Он заключается в технологической замене типов воздушных судов (вертолеты заменяем на легкие самолеты). Кроме этого, в рамках концепции планируется полное преобразование системы регионального авиасообщения посредством создания внутри края схемы пересадочных узлов и хабов. Так, сообщение из Красноярска будет осуществляться на судах большой вместимости, а разлет по территориям — на легкомоторных самолетах. Безусловно, данная схема существенно сократит количество прямых маршрутов из Красноярска. Узловое расписание позволит кардинально повысить частоту выполнения рейсов и развить сеть межмуниципальных авиасвязей, особо значимых для тех направлений, где нет транспортных альтернатив.

Следующим этапом после формирования архитектуры маршрутной авиасети и концепции организации перевозочного процесса является выбор типов самолетов.

Красноярскому краю до 2020 г. потребуется около двадцати 9–14-местных легких самолетов укороченного взлета/посадки. Учитывая область применения и географию полетов, эти самолеты должны быть однодвигательными для минимизации себестоимости перевозок и отличаться максимально возможной утилитарностью: гибкой конвертацией салона, наличием большого багажного отсека, грузовой двери, минимальной механизацией (неубирающимися шасси, негерметичным салоном) и упрощенной электроникой (стрелочной кабиной).

На начальном этапе работы над концепцией в качестве базового варианта рассматривался широко распространенный за рубежом и успешно зарекомендовавший себя в нашей стране самолет Cessna Caravan. Естественно, не ставится задача его копирования на отечественных заводах, но представляется необходимым на его основе разработать модель отечественного самолета, подходящего как для посадок в труднодоступные

населенные пункты, так и для выполнения регулярных рейсов между аэропортами.

Проведенные исследования показали, что аналогично обстоит дело и с региональным самолетом. Оптимальная загрузка самолетов краевых авиакомпаний и в целом по стране составляет 30–40 кресел, в отличие от сегодняшней зарубежной нормы 60–70 кресел.

Следует отметить, что в России самолеты необходимой емкости сегодня практически не производятся.

География и область использования формируют ряд других принципиальных требований к будущему самолету региональной авиации. Учитывая низкое качество наземной инфраструктуры, это должен быть высокоплан с легкой конвертацией салона, наличием увеличенных багажных отсеков, возможностью грузопассажирской компоновки.

Таким образом, алгоритм принятия решений об особенностях отечественных самолетов должен основываться, в первую очередь, на потребностях регионов, в противном случае существует серьезный риск создания модели, неадекватной условиям эксплуатации.

Немаловажными составляющими являются существенное наращивание транспортной активности и ценовая доступность внутрирегиональных перевозок при условии расширения программ федерального финансирования, способные существенно увеличить спрос на региональную авиатехнику в среднесрочной перспективе. Под федеральным финансированием Красноярский край подразумевает и скорейшую передачу в фе-

деральное казенное предприятие основной массы региональных аэропортов, и снижение в них ставок сборов, например, посредством послабления сертификационных требований, и увеличение субсидий по лизингу региональной авиатехники в рамках Федерального постановления № 1212 [3]. Отдельным вопросом является расширение действия Федерального постановления № 1242 [4] на внутрирегиональные маршруты. Ограничение действия программы только на межрегиональные рейсы не отражает реалии рынка — в Красноярском крае есть внутрирегиональные маршруты, сопоставимые по протяженности с магистральными авиалиниями центральной полосы России.

Заключение

Представленные модель и концептуальные подходы к развитию региональной авиации и, как следствие, отечественного авиапрома позволяют сформировать опытно-апробационный полигон на базе Красноярского края. Уникальные территориально-климатические условия и наработанный опыт будут способствовать эффективной выработке модели развития региональной авиации. При этом предложенный алгоритм принятия решений, определяющий приоритетные (базовые) принципы формирования требований к региональным самолетам, предоставит возможность системно и качественно решить вопросы регионального авиасообщения с использованием адаптированных под потребности регионов отечественных самолетов.

Литература

1. **Мониторинг** состояния и потребности рынка региональных и местных авиаперевозок в современных самолетах: доклад ФГУП «Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации». <http://gosniiga.ru/oldsite/an.html> (дата обращения: 16.03.2015).
2. **Закон** Красноярского края от 01.12.2014 № 7-2877 «О краевом бюджете на 2015 год и плановый период 2016–2017 годов». <http://www.zakon.krskstate.ru/0/doc/21751> (дата обращения: 16.03.2015).
3. **Постановление** Правительства Российской Федерации от 30.12.11 № 1212 «Об утверждении правил предоставления субсидий из федерального бюджета на возмещение российским авиакомпаниям части затрат на уплату лизинговых платежей за воздушные суда, получаемые российскими авиаком-

паниями от лизинговых компаний по договорам лизинга для осуществления внутренних региональных и местных воздушных перевозок» // Компьютерная справочно-правовая система «КонсультантПлюс». <http://www.consultant.ru/> (дата обращения: 16.03.2015).

4. **Постановление** Правительства Российской Федерации от 25.12.13 № 1242 «О предоставлении субсидий из федерального бюджета организациям воздушного транспорта на осуществление региональных воздушных перевозок пассажиров на территории Российской Федерации и формирование региональной маршрутной сети Российской Федерации». <http://www.consultant.ru/> (дата обращения: 16.03.2015).

UDC 65.012.12

doi:10.15217/issn1684-8853.2015.3.117

Decision-Making Algorithm for Regional Aviation and Aircraft Design in Krasnoyarsk KraiEremin S. V.^a, PhD Tech., Minister of Transport of Krasnoyarsk Krai, 140576@mail.ru^aMinistry of Transport of Krasnoyarsk Krai, 47, Surikova St., 660049, Krasnoyarsk, Russian Federation

Purpose: Modern Russian aviation industry gives priority to aircraft manufacturing over the market demands. However, the real demands of regional aviation should determine the design of an aviation network as the main condition when choosing the types and options for regional aircrafts. The goal of this paper is developing a decision-making algorithm which would define the main principles of setting the requirements for regional aircrafts. **Results:** Considering the performance of the aviation service in Krasnoyarsk Krai, certain requirements have been outlined for a regional aircraft, and the following technical data and specifications of national aircrafts have been defined for regional aviation: utility, multifunctional cabins for passengers and cargo, fewer mechanical parts, simple electronics and short takeoff. **Practical relevance:** Given that the aviation industry is rapidly developing, the developed algorithm can help to systematize and justify the options of the regional aircrafts for their safe operation in regional and remote areas of Russian Federation. It also can help to considerably lessen the period of aircraft adaptation for local conditions.

Keywords — Regional Aviation, System of Development, System Analysis, Management Systems.

References

1. *Monitoring sostoiianiia i potrebnosti rynka regional'nykh i mestnykh aviaperevozok v sovremennykh samoletakh* [Current State and Market Demands of Regional and Local Air Service and Airlines Park]. Available at: <http://www.gosniiga.ru/an.html> (accessed 16 March 2015).
2. *Zakon Krasnoiarshkogo kraia ot 01.12.2014 № 7-2877 "O kraevom biudzhete na 2015 god i planovyi period 2016–2017 godov"* [Krasnoyarsk Krai Law of 01.12.2014, no. 7-2877 "Regional Budget for 2015 and for the Planning Period of 2016 and 2017"]. Available at: <http://www.zakon.krskstate.ru/0/doc/21751> (accessed 16 March 2015).
3. *Postanovlenie Pravitel'stva Rossiiskoi Federatsii ot 30.12.11 № 1212 "Ob utverzhdenii pravil predostavleniia subsidei iz federal'nogo biudzheta na vozmeshchenie rossiiskim aviakompaniiam chasti zatrat na uplatu lizingovykh platezhei za vozdushnye suda, poluchaemye rossiiskimi aviakompaniiami ot lizingovykh kompanii po dogovoram lizinga dlia osu-*
4. *shchestvleniia vnutrennikh regional'nykh i mestnykh vozdu-shnykh perevozok*" [Resolution of the Russian Government of 30.12.11, no. 1212 "Regulations for the Provision of Subsidies to Russian Air Companies and Aircraft Companies to Reimburse Part of their Loan Costs"]. Available at: <http://www.consultant.ru/> (accessed 16 March 2015).
4. *Postanovlenie Pravitel'stva Rossiiskoi Federatsii ot 25.12.13 № 1242 "O predostavlenii subsidei iz federal'nogo biudzheta organizatsiiam vozdushnogo transporta na osushchestvlenie regional'nykh vozdushnykh perevozok passazhirov na territorii rossiiskoi federatsii i formirovanie regional'noi marshrutnoi seti rossiiskoi federatsii"* [Resolution of the Russian Government of 25.12.13, no. 1242 "Regulations for Paying Subsidies from the Federal Budget to Air Companies to Develop Regional Aviation Networks in the Russian Federation"]. Available at: <http://www.consultant.ru/> (accessed 16 March 2015).

АГАПОВ
Владимир
Анатольевич



Соискатель ученой степени кандидата технических наук, младший научный сотрудник лаборатории методов и средств автоматизации Института проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург.

В 2011 году окончил Санкт-Петербургский государственный политехнический университет по специальности «Автоматизированные системы обработки информации и управления».

Является автором одной научной публикации.

Область научных интересов — моделирование механических систем, проектирование систем управления.

Эл. адрес: agapov1989@mail.ru

БАЛОНИН
Николай
Алексеевич



Профессор кафедры вычислительных систем и сетей Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

В 1982 году окончил Ленинградский электротехнический институт им. В. И. Ульянова (Ленина) по специальности «Автоматика и телемеханика».

В 2008 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.

Является автором более 80 научных публикаций, в том числе трех монографий.

Область научных интересов — теория динамических систем, теория идентификации, теория операторов, теория матриц, вычислительные методы, интернет-робототехника, интернет-книги с исполняемыми алгоритмами, научные социальные сети.

Эл. адрес: korbendfs@mail.ru

БЕН-ШИМОЛ
Иегуда



Гражданин Израиля.

Профессор кафедры систем связи инженерного факультета Негевского университета им. Бен-Гуриона, Беэр-Шева, Израиль.

В 1986 году окончил Негевский университет им. Бен-Гуриона по специальности «Электротехника и вычислительная техника».

В 1997 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора наук (PhD).

Является автором 51 научной публикации.

Область научных интересов — проводные и беспроводные системы связи, комбинаторная оптимизация, параллельные, распределенные и символьные вычисления.

Эл. адрес: benshimo@bgu.ac.il

ВАСИЛЬЕВ
Николай
Николаевич



Старший научный сотрудник лаборатории теории представлений и динамических систем Санкт-Петербургского отделения Математического института им. В. А. Стеклова РАН.

В 1975 году окончил математико-механический факультет Ленинградского государственного университета по специальности алгебра и теория чисел.

В 1990 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.

Является автором более 120 научных публикаций.

Область научных интересов — компьютерная алгебра, вычислительная алгебраическая геометрия и коммутативная алгебра, теория динамических систем, небесная механика.

Эл. адрес: vasiliev@pdmi.ras.ru

ВОЛХОНСКИЙ
Владимир
Владимирович



Профессор кафедры твердотельной оптоэлектроники Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики.

В 1974 году окончил Ленинградский институт авиационного приборостроения по специальности «Радиотехника».

В 2013 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.

Является автором более 210 научных и учебно-методических публикаций, в том числе 11 монографий.

Область научных интересов — интегрированные системы безопасности, системы охранной сигнализации, контроля доступа, телевизионного наблюдения.

Эл. адрес: volkhonski@mail.ru

ГОРОДЕЦКИЙ
Андрей
Емельянович



Доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией методов и средств автоматизации Института проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, заслуженный деятель науки и техники.

В 1965 году окончил Ленинградский политехнический институт им. М. И. Калинина по специальности «Автоматика и телемеханика».

В 1993 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.

Является автором более 150 научных публикаций и 70 изобретений.

Область научных интересов — математическое моделирование, оптимальное управление, идентификация и диагностика.

Эл. адрес: gorodetsky@mail23.ipme.ru

**ДЕКЕЛЬ
Бен Цион**



Гражданин Израиля. Руководитель программы исследований в области электричества и электроники, старший преподаватель академического центра Руппин, ЭмекХефер, Израиль. В 2001 году окончил Тель-Авивский университет по специальности «Электрооптика». В 2001 году защитил диссертацию (PhD) по специальности «Электротехника». Является автором 14 научных публикаций. Область научных интересов — инфракрасные волноводы, медицинское применение спектроскопии. Эл. адрес: benziobd@ruppin.ac.il

**ДЖОКОВИЧ
Драгомир**



Гражданин Канады. Почетный профессор кафедры теоретической математики Университета Ватерлоо, Ватерлоо, Онтарио, Канада. В 1960 году окончил Белградский университет по специальности «Электротехника», Белград, Югославия. В 1963 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора наук в Белградском университете. Является автором более 200 научных публикаций. Область научных интересов — линейная и полилинейная алгебра, теория групп, алгебра Ли и групп Ли, квантовая запутанность, комбинаторика. Эл. адрес: djokovic@uwaterloo.ca

**ДОЙНИКОВА
Елена
Владимировна**



Младший научный сотрудник лаборатории проблем компьютерной безопасности Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН. В 2009 году окончила с отличием Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) по специальности «Компьютерная безопасность». Является автором более 40 научных публикаций. Область научных интересов — безопасность компьютерных сетей, методы анализа рисков компьютерных сетей, управление информационными рисками. Эл. адрес: doynikova@comsec.spb.ru

**ДУЖИН
Василий
Сергеевич**



Соискатель лаборатории теории представлений и динамических систем Санкт-Петербургского отделения Математического института им. В. А. Стеклова РАН. В 2010 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения по специальности «Вычислительные машины, комплексы, системы и сети». Является автором пяти научных публикаций. Область научных интересов — компьютерная алгебра, компьютерное моделирование, дискретная математика, системы хранения данных. Эл. адрес: vduzhin@gmail.com

**ЕРЕМИН
Сергей
Васильевич**



Министр транспорта Красноярского края. В 1998 году окончил Красноярский государственный технический университет, автотранспортный факультет по специальности «Организация перевозок и управление на автомобильном транспорте». В 2001 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 13 научных публикаций. Область научных интересов — анализ и управление информационными потоками в транспортной области, моделирование транспортных задач, информационные системы. Эл. адрес: 140576@mail.ru

**КАРАВАЕВ
Анатолий
Сергеевич**



Доцент Саратовского государственного университета им. Н. Г. Чернышевского. В 2004 году окончил Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского по специальности «Физика». В 2007 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Является автором более 80 научных публикаций. Область научных интересов — радиоп физика, стохастическая динамика и хаос, кодирование и передача информации. Эл. адрес: karavaevas@gmail.com

**КИТРОСЕР
Ицик**



Гражданин Израиля. Директор по стандартам сетевой виртуализации (NFV) корпорации Amdocs, Раанана, Израиль. В 2008 году окончил Негевский университет им. Бен-Гуриона, Израиль, по специальности «Математика и компьютерные науки». В 2012 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора наук (PhD). Является автором 11 научных публикаций. Область научных интересов — MAC-протоколы оптимизации, кооперативные связи, системы многопользовательского доступа, теория коммуникаций. Эл. адрес: kitroser@bgu.ac.il

**КОВАЛЕНКО
Иван
Иванович**



Доцент кафедры физики Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. В 1986 году окончил Ленинградский государственный университет по специальности «Физика. Оптика и спектроскопия». В 1989 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Является автором 20 научных публикаций. Область научных интересов — оптика и спектроскопия, оптическое приборостроение. Эл. адрес: docent_95@inbox.ru

**КОТЕНКО
Игорь
Витальевич**



Профессор, заведующий лабораторией проблем компьютерной безопасности Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН. В 1983 году окончил Военно-космическую академию им. А. Ф. Можайского по специальности «Математическое обеспечение автоматизированных систем управления», в 1987 году — Военную академию связи по специальности «Инженерная автоматизированных систем управления». В 1999 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором более 450 научных публикаций. Область научных интересов — безопасность компьютерных сетей, обнаружение компьютерных атак, межсетевые экраны, защита от вирусов и сетевых червей и др. Эл. адрес: ivkote@comsec.spb.ru

**КОТЛИКОВ
Евгений
Николаевич**



Профессор, доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой физики Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, заслуженный работник высшей школы РФ. В 1969 году окончил Ленинградский государственный университет по специальности «Физика. Оптика и спектроскопия». В 1982 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. Является автором 150 научных публикаций и 13 изобретений. Область научных интересов — оптика и спектроскопия, оптическое приборостроение, физика тонких пленок. Эл. адрес: ekotlikov45@mail.ru

**КРЕПКИЙ
Илья
Александрович**



Аспирант математико-механического факультета Санкт-Петербургского государственного университета. В 2012 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет по специальности «Математика». Является автором трех научных публикаций. Область научных интересов — песочные группы, комбинаторика, теория групп, графы, теория комбинаторных типов, клеточные автоматы. Эл. адрес: feb418@gmail.com

**КУЗНЕЦОВ
Виталий
Александрович**



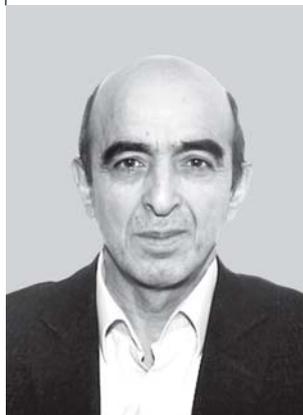
Ассистент кафедры информационно-сетевых технологий Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. В 2012 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, присвоена степень магистра информационных систем. Является автором четырех научных публикаций. Область научных интересов — машинное зрение, цифровая обработка изображений, трехмерное сканирование. Эл. адрес: k.avk-c@mail.ru

КУЛЬМИНСКИЙ
Данил
Дмитриевич



Младший научный сотрудник Саратовского филиала Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, аспирант Саратовского государственного университета им. Н. Г. Чернышевского. В 2014 году окончил Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского по специальности «Методы и устройства обработки сигналов и данных». Является автором семи научных публикаций. Область научных интересов — радиофизика, нелинейная динамика.
Эл. адрес: kulminskydd@gmail.com

КУРБАНОВ
Вугар
Гариб оглы



Старший научный сотрудник лаборатории методов и средств автоматизации Института проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург. В 1976 году окончил Азербайджанский государственный университет им. С. М. Кирова по специальности «Прикладная математика». В 1983 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Является автором более 50 научных публикаций. Область научных интересов — математическое моделирование процессов управления, методы логического анализа систем, логико-вероятностные методы.
Эл. адрес: vugar_borchali@yahoo.com

ЛЕШКО
Николай
Александрович



Доцент, докторант Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург. В 1991 году окончил Ярославское высшее зенитное ракетное командное училище ПВО по специальности «Инженер по эксплуатации радиоэлектронных систем». В 2003 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 60 научных публикаций и одного патента на изобретение. Область научных интересов — многопозиционные радиолокационные системы.
Эл. адрес: Nikolai_ZRU@mail.ru

МАЛЫШ
Владимир
Николаевич



Профессор, декан факультета физико-математических и компьютерных наук, заведующий кафедрой электроники телекоммуникаций и компьютерных технологий Липецкого государственного педагогического университета. В 1980 году окончил Университет дружбы народов им. П. Лумумбы по специальности «Физика». В 2004 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором 180 научных публикаций. Область научных интересов — системный анализ, управление в социальных системах.
Эл. адрес: vmalysh@mail.ru

МАЛЫШКИН
Сергей
Леонидович



Аспирант кафедры твердотельной оптоэлектроники Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики. В 2012 году окончил Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики по специальности «Лазерная техника и лазерные технологии». Является автором девяти научных публикаций. Область научных интересов — системы физической защиты, физическая защита информации.
Эл. адрес: malyshkin-sl@mail.ru

НОВИКОВА
Юлиана
Александровна



Аспирант кафедры физики Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. В 2011 году окончила Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения по специальности «Оптотехника, лазерные приборы и системы». Является автором 17 научных публикаций. Область научных интересов — физическая оптика, тонкие пленки, оптика лазеров.
Эл. адрес: Nov-Jliana@yandex.ru

ПЕШКОВА
Галина
Юрьевна



Доцент кафедры международных отношений Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

В 1977 году окончила Курский государственный педагогический институт по специальности «Французский и немецкий язык», в 1997 — Санкт-Петербургскую государственную инженерно-экономическую академию по специальности «Экономист».

В 2002 году защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата экономических наук.

Является автором 30 научных публикаций.

Область научных интересов — системный анализ, управление, моделирование и обработка информации в сложных социально-экономических системах и др.

Эл. адрес: pgu@guar.ru

ПОНОМАРЕНКО
Владимир
Иванович



Доцент, ведущий научный сотрудник Саратовского филиала Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН.

В 1982 году окончил Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского по специальности «Радиофизика».

В 2008 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора физико-математических наук.

Является автором более 200 научных публикаций.

Область научных интересов — стохастическая динамика и хаос, нелинейные колебания и волны, радиофизика, кодирование и передача информации, анализ временных рядов.

Эл. адрес:

ponomarenkovi@gmail.com

ПОРТНОЙ
Сигал



Гражданин Израиля.

Руководитель лаборатории двигательных функций и реабилитации, преподаватель Тель-Авивского университета, Тель-Авив, Израиль.

В 2010 году окончил Тель-Авивский университет по специальности «Медицинские системы».

В 2010 году защитил диссертацию (PhD) по специальности «Биомедицинская техника».

Является автором 18 научных публикаций.

Область научных интересов — двигательная функция, реабилитация.

Эл. адрес:

portnoys@post.tau.ac.il

ПРОХОРОВ
Михаил
Дмитриевич



Доцент, заведующий лабораторией моделирования в нелинейной динамике Саратовского филиала Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН.

В 1992 году окончил Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского по специальности «Радиофизика».

В 2008 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора физико-математических наук.

Является автором более 200 научных публикаций.

Область научных интересов — нелинейные колебания и волны, математическое моделирование, стохастическая динамика и хаос, анализ временных рядов.

Эл. адрес:

mdprokhorov@yandex.ru

СИМАНА
Еран



Гражданин Израиля.

Медицинский инженер Гилель Яффского медицинского центра, Хадера, Израиль.

В 2013 году окончил академический центр Руппин по специальности «Медицинские системы».

В 2013 году защитил диссертацию на соискание степени бакалавра (B.Sc) по специальности «Медицинская техника».

Область научных интересов — Витамин D (VIS + IR).

Эл. адрес:

eran.simana@gmail.com

СИМИАН
Ронен



Гражданин Израиля.

Системный аналитик, ООО Базилла (Buzzilla), Тель-Авив, Израиль.

В 2013 году окончил академический центр Руппин по специальности «Медицинские системы».

В 2013 году защитил диссертацию на соискание степени бакалавра (B.Sc) по специальности «Инженер-электрик».

Область научных интересов — IR-спектроскопия.

Эл. адрес:

ronensimian@gmail.com

**СКАКОВ
Евгений
Сергеевич**



Аспирант факультета физико-математических и компьютерных наук Липецкого государственного педагогического университета, инженер по автоматизации и механизации производственных процессов ОАО «НЛМК», Липецк.
В 2011 году окончил Липецкий государственный технический университет по специальности «Автоматизированные системы обработки информации и управления».
Является автором восьми научных публикаций.
Область научных интересов — алгоритмы решения оптимизационных задач, реляционные базы данных, объектно-ориентированное программирование.
Эл. адрес: wallkirya@mail.ru

**ТАТАРНИКОВА
Татьяна
Михайловна**



Профессор кафедры безопасности информационных систем Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.
В 1993 году окончила Восточно-Сибирский технологический институт по специальности «Электронно-вычислительные машины, комплексы, системы и сети».
В 2007 году защитила диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.
Является автором более 100 научных публикаций.
Область научных интересов — инфокоммуникации, взаимодействие неоднородных сетей.
Эл. адрес: tm-tatarn@yandex.ru

**ЦЫБУЛЬНИК
Александр
Николаевич**



Профессор кафедры электроники Ярославского филиала Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского.
В 1978 году окончил Минское высшее инженерное зенитное ракетное училище ПВО по специальности «Радиотехнические средства».
В 1986 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук.
Является автором более 150 научных публикаций, шести авторских свидетельств и патентов на изобретения.
Область научных интересов — разнесенные радиолокационные системы с некооперируемыми источниками излучения.
Эл. адрес: CAN1956@mail.ru

**ТАРАСОВА
Ирина
Леонидовна**



Доцент, старший научный сотрудник Института проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург.
В 1978 году окончила Ленинградский политехнический институт им. М. И. Калинина по специальности «Автоматические системы управления».
В 1998 году защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук.
Является автором более 50 научных публикаций.
Область научных интересов — математическое моделирование, оптимальное управление, идентификация и диагностика.
Эл. адрес: til@msa2.ipme.ru

**ФРИДМАН
Александр
Яковлевич**



Профессор, ведущий научный сотрудник лаборатории информационных технологий управления промышленно-природными системами Института информатики и математического моделирования Кольского научного центра РАН, Апатиты.
В 1975 году окончил Ленинградский электротехнический институт им. В. И. Ульянова (Ленина).
В 2001 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.
Является автором 240 научных публикаций, в том числе четырех монографий, 22 учебных пособий и 16 изобретений.
Область научных интересов — моделирование комплексных технологий и их воздействия на окружающую среду, прикладные интеллектуализированные системы.
Эл. адрес: fridman@iimm.ru

**ЯФФЕ
Анат**



Гражданка Израиля.
Директор группы эндокринологии и диабета Яффского медицинского центра, Яффе, Израиль.
В 1987 году окончила Тель-Авивский университет по специальности «Эндокринология».
В 2006 году защитила диссертацию на соискание ученой степени доктора медицины (MD) в Тель-Авивском университете.
Является автором 17 научных публикаций.
Область научных интересов — эндокринология.
Эл. адрес: anatjaffe@gmail.com

**Хабаровск
2015**



**ХАБАРОВСКАЯ
МЕЖДУНАРОДНАЯ
ЯРМАРКА**

**16 – 19 сентября
специализированная выставка**

**АВТОМАТИЗАЦИЯ
БЕЗОПАСНОСТЬ
СВЯЗЬ – 2015**

**Тел./факс: (4212) 56-76-50
E-mail: comp@khabexpo.ru**

www.khabexpo.ru



ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

**Легкоатлетический манеж
стадиона им. В.И. Ленина**