

ISSN 1684–8853

ИНФОРМАЦИОННО- УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

6(79)/2015

6(79)/2015

INFORMATSIONNO- UPRAVLIAYUSHCHIE SISTEMY (INFORMATION AND CONTROL SYSTEMS)

REFEREED EDITION

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, USA
L. Chubraeva
RAS Corr. Member, Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, RussiaL. Fortuna
PhD, Professor, Catania, ItalyA. Fradkov
Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, RussiaV. Kozlov
Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, RussiaB. Meyer
Dr. Sc., Professor, Zurich, SwitzerlandA. Ovodenko
Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, RussiaY. Podoplyokin
Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, RussiaYu. Shokin
RAS Academician, Dr. Sc., Phys.-Math., Novosibirsk, RussiaV. Simakov
Dr. Sc., Tech., Professor, Moscow, RussiaV. Vasilev
RAS Corr. Member, Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, RussiaR. Yusupov
RAS Corr. Member, Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia**Editorial Board**V. Anisimov
Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, RussiaB. Bezruchko
Dr. Sc., Phys.-Math., Saratov, RussiaN. Blaunstein
Dr. Sc., Phys.-Math., Professor, Beer-Sheva, IsraelA. Dudin
Dr. Sc., Tech., Professor, Minsk, BelarusI. Dumer
PhD., Professor, Riverside, USAV. Khimenko
Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, RussiaG. Maltsev
Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, RussiaV. Melekhin
Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, RussiaA. Shalyto
Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, RussiaA. Shepeta
Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, RussiaA. Smirnov
Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, RussiaZ. Yuldashev
Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, RussiaA. 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. Morskaya, 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., Sergeev M. B.** *Initial Approximation Matrices in Search for Generalized Weighted Matrices of Global or Local Maximum Determinant* 2**INFORMATION PROCESSING AND CONTROL****Kozionov A. P., Pyayt A. L., Mokhov I. I., Ivanov U. P.** *Algorithm for Dike Abnormal Behavior Detection Based on Transfer Function Model and One-Class Classification* 10**Lakhin O. I.** *Analysis of Cargo Flow Adaptive Scheduling Events for the Russian Segment of the International Space Station* 19**INFORMATION AND CONTROL SYSTEMS****Burakov M. V., Konovalov A. S., Yakovets O. B.** *Evolutionary Design of Fuzzy Controllers* 28**Markelov V. V., Kostishin M. O., Shukalov A. V.** *Aircraft Inertial Navigation System Pre-takeoff Course Correction by Information from a Satellite Navigation System* 34**SYSTEM AND PROCESS MODELING****Tkacheva A. A., Favorskaya M. N.** *Modeling of 3D Forest Scenes by Laser Scanning and Air Photo Data* 40**Mikhailov V. V., Solov'eva T. N., Popov V. P.** *Kinematic Modeling of a Walking Machine* 50**HARDWARE AND SOFTWARE RESOURCES****Torgashev V. A., Tsarev I. V.** *Technologies of Solving Complicated Problems on the Base of Dynamic Automata Networks* 57**Solnitsev R. I., Karimov A. I., Karimov T. I., Butusov D. N., Mkrtychyan A. R., Yakimovsky D. O.** *Automated Workplace for a Designer of Digital Controllers for Command Devices* 66**INFORMATION CHANNELS AND MEDIUM****Savischenko N. V., Ostroumov O. A.** *Calculation of Optimal and Reasonable Number of Diversity Branches in Communication Channels with Additive White Gaussian Noise and Common Rice – Nakagami Fading* 71**Ashurkov I. S., Kakaev V. V., Leshko N. A.** *Multiposition Radar System Space Structure Optimization* 81**INFORMATION AND MEASURING SYSTEMS****Kaplin A.Y., Stepanov M. G.** *Using Autonomous Navigation Systems for High-Precision Positioning of a Pedestrian on the Ground* 86**Zhilnikova N. A., Alekseev V. A., Shishkin I. A.** *Geoinformational Information-Measuring System for Flood Protection Monitoring of Fuel-Power Complex Territory* 93**INFORMATION INSTRUMENTATION AND EDUCATION****Prokofieva A. L.** *E-study Courses for Studying Foreign Language at Higher Education Establishments* 98**CONTROL IN SOCIAL AND ECONOMIC SYSTEMS****Chugunov E. S., Zakharov V. V.** *Heuristic Method for Solving Multi-Product Inventory Routing Problem* 105**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS** 112*Contents of the journal «Informatisionno-upravliayushchie sistemy (Information and Control Systems)» for 2015* 119

The Journal was registered in the Ministry of Press, Broadcasting and Mass Media of the Russian Federation. Registration Certificate JD № 77-12412 from April, 19, 2002. Re-registration in the Federal Service for Supervision in the Sphere of Telecom, Information Technologies and Mass Communications (ROSKOMNADZOR) due to change of the founder: «Information and Control Systems», Ltd., JD № FS77-49181 from March, 30, 2012.

Submitted for publication 11.11.15. Passed for printing 17.12.15. Format 60×84_{1/8}. Offset paper. Phototype SchoolBookC. Offset printing.

Layout original is made at the Editorial and Publishing Center, SUAI, 67, B. Morskaya, 190000, St. Petersburg, Russia. Printed from slides at the Editorial and Publishing Center, SUAI, 67, B. Morskaya, 190000, St. Petersburg, Russia.

The journal is distributed by subscription. Subscription can be made in the Editorial and publishing center, SUAI as well as in any post office based on «Rospechat» catalogue: № 48060 — annual subscript, № 15385 — semiannual subscript.

6(79)/2015

РЕЦЕНЗИРУЕМОЕ ИЗДАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

Учредитель

ООО «Информационно-управляющие системы»

ИздательСанкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения**Главный редактор**М. Б. Сергеев,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ**Зам. главного редактора**Е. А. Крук,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ**Ответственный 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, РФ

К. Кристоделу,

д-р наук, проф., Альбукерке, Нью-Мексико, США

Б. Мейер,

д-р наук, проф., Цюрих, Швейцария

Ю. Ф. Подоплёкин,

д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

В. В. Симаков,

д-р техн. наук, проф., Москва, РФ

Л. Фортуна,

д-р наук, проф., Катания, Италия

А. Л. Фрадков,

д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

Л. И. Чубраева,

чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, С.-Петербург, РФ

Ю. 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, РФ

Н. Блаунштейн,

д-р физ.-мат. наук, проф., Беэр-Шева, Израиль

А. Н. Дудин,

д-р физ.-мат. наук, проф., Минск, Беларусь

И. И. Думер,

д-р наук, проф., Риверсайд, США

А. И. Зейфман,

д-р физ.-мат. наук, проф., Вологда, РФ

Г. Н. Мальцев,

д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

В. Ф. Мелехин,

д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

А. В. Смирнов,

д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

В. И. Хищенко,

д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

А. А. Шальто,

д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

А. П. Шепета,

д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

З. М. Юлдашев,

д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

Редактор: А. Г. Ларионова**Корректор:** Т. В. Звертановская**Дизайн:** Н. Н. Караваева, М. Л. Черненко**Компьютерная верстка:** Н. Н. Караваева**Адрес 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., Сергеев М. Б.** О значении матриц начального приближения в алгоритме поиска обобщенных взвешенных матриц глобального и локального максимума детерминанта 2**ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И УПРАВЛЕНИЕ****Козионов А. П., Пяйт А. Л., Мохов И. И., Иванов Ю. П.** Алгоритм на основе модели передаточной функции и одноклассовой классификации для обнаружения аномального состояния дамб 10**Лахин О. И.** Анализ событий адаптивного планирования грузопотока российского сегмента международной космической станции 19**ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ****Бураков М. В., Коновалов А. С., Яковец О. Б.** Эволюционный синтез нечетких регуляторов 28**Маркелов В. В., Костишин М. О., Шукалов А. В.** Коррекция курса инерциальной навигационной системы до взлета самолета по информации от спутниковой навигационной системы 34**МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ****Ткачева А. А., Фаворская М. Н.** Моделирование трехмерных сцен лесных участков по данным лазерного сканирования и аэрофотоснимкам 40**Михайлов В. В., Соловьева Т. Н., Попов В. П.** Моделирование кинематики шагающего робота 50**ПРОГРАММНЫЕ И АППАРАТНЫЕ СРЕДСТВА****Торгашев В. А., Царев И. В.** Технологии решения сложных задач на основе динамических автоматных сетей 57**Сольнищев Р. И., Каримов А. И., Каримов Т. И., Бутусов Д. Н., Мкртычян А. Р., Якимовский Д. О.** Автоматизированное рабочее место проектировщика цифровых регуляторов командных приборов 66**ИНФОРМАЦИОННЫЕ КАНАЛЫ И СРЕДЫ****Савищенко Н. В., Остроумов О. А.** Расчет оптимального и рационального числа ветвей разнесения в каналах связи с аддитивным белым гауссовым шумом и общими замираниями Райса — Накагами 71**Ашурков И. С., Какаев В. В., Лешко Н. А.** Оптимизация пространственной структуры многопозиционной радиолокационной системы 81**ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ****Каплин А. Ю., Степанов М. Г.** Использование автономной навигационной системы высокоточного позиционирования пешехода на местности 86**Жильникова Н. А., Алексеев В. В., Шишкин И. А.** Информационно-измерительная система мониторинга защиты территории топливно-энергетического комплекса от подтопления на основе геоинформационной технологии 93**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБРАЗОВАНИЕ****Прокофьева А. Л.** Применение электронных учебных курсов в процессе изучения иностранного языка в высшем учебном заведении 98**УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ****Чугунов Е. С., Захаров В. В.** Эвристический метод решения многопродуктовой задачи управления запасами 105**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

Содержание журнала «Информационно-управляющие системы» за 2015 г. [№ 1–6] 119

Сдано в набор 11.11.15. Подписано в печать 17.12.15. Формат 60×84 1/8.

Бумага офсетная. Гарнитура SchoolBookC. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 14,2. Уч.-изд. л. 17,8. Тираж 1000 экз. Заказ 497.

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.

УДК 519.614

doi:10.15217/issn1684-8853.2015.6.2

О ЗНАЧЕНИИ МАТРИЦ НАЧАЛЬНОГО ПРИБЛИЖЕНИЯ В АЛГОРИТМЕ ПОИСКА ОБОБЩЕННЫХ ВЗВЕШЕННЫХ МАТРИЦ ГЛОБАЛЬНОГО И ЛОКАЛЬНОГО МАКСИМУМА ДЕТЕРМИНАНТА

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

М. Б. Сергеев^а, доктор техн. наук, профессор

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

Цель: показать значение матриц начального приближения, задающих структуру в задачах поиска ортогональных многоуровневых матриц глобального и локального максимумов детерминанта. **Методы:** поиск матриц глобального и локального максимумов детерминанта ведется итерационной вычислительной процедурой, ориентированной на минимизацию максимального абсолютного значения элементов ортогональной матрицы с предвычислением ее начального приближения в заданной априори структурированной форме. **Результаты:** предложенный подход, учитывающий на начальном этапе вычислений структуру и симметрию, существенно повышает эффективность поиска ортогональных по строкам (столбцам) обобщенных взвешенных матриц. Показана целесообразность учета как явной, так и неявных симметрий матриц. Приведены примеры скрытых симметрий матриц и указаны связанные с ними преобразования, эквивалентные по отношению к значению детерминанта матрицы. **Практическая значимость:** обобщенные взвешенные матрицы глобального и локального максимумов детерминанта ортогональны и имеют практическое значение в решении задач помехоустойчивого кодирования, сжатия и маскирования видеоинформации.

Ключевые слова — вычислительные методы, ортогональные матрицы, взвешенные матрицы, адамаровы матрицы, циклические матрицы, негациклические матрицы, бициклические матрицы.

Введение

Численные методы линейной алгебры обобщают обширный опыт вычислений с применением компьютеров, освещенный в научной литературе и справочниках. Среди книг можно отметить выдержавшую не одно издание книгу Д. К. Фаддеева и В. Н. Фаддеевой [1], а также систематизированный обзор вычислительных методов В. В. Воеводина и Ю. А. Кузнецова [2]. Классическими также стали труды Ф. Р. Гантмахера, Р. Беллмана, П. Ланкастера, Р. Хорна и Ч. Джонсона, Дж. Галуба и Ч. Ван Луана, А. А. Самарского, И. С. Березина и Н. П. Жидкова, Дж. Райса и многих других авторов. Из новых опубликованы, например, работы Е. Е. Тарышниковой [3] и С. П. Шарого [4].

В вычислительной математике можно выделить два сложившихся крупных направления. Во-первых, это решение систем линейных алгебраических уравнений и всего, что с ними связано: использование симметрий, вычисление показателей обусловленности, методы регуляризации плохо обусловленных задач, вопросы разложения матриц коэффициентов, распараллеливания вычислений и др. Во-вторых — решение общей алгебраической проблемы поиска собственных значений, также вмещающее в себя немало разветвлений.

Вычисление детерминанта реализуется в рамках обоих этих направлений [1–5], и открыть для

него еще один численный метод кажется затруднительным. Вместе с тем оптимизация детерминанта матрицы варьированием значений ее элементов — задача иная и заведомо более сложная. Особенно, если матрица должна удовлетворять некоторым дополнительным уравнениям связи. Классические подходы к оптимизации функций нескольких аргументов здесь практически бесполезны, поскольку число аргументов — элементов матрицы — находится в квадратичной зависимости от ее порядка.

Цель настоящей статьи — осветить новый опыт авторов, работающих над решением задачи вычисления матриц глобального или локального максимумов детерминанта [5–7].

Постановка задачи и возможные решения

Рассматриваемая задача имеет простую постановку: требуется найти квадратную матрицу \mathbf{A} порядка n , определенную над полем вещественных чисел, обладающую глобальным или локальным максимумом модуля детерминанта $\det(\mathbf{A})$ при ограничениях на абсолютные значения величин ее элементов в виде $|a_{ij}| \leq 1$ и наличии квадратичного уравнения связи $\mathbf{A}^T \mathbf{A} = \omega(n) \mathbf{I}$, где $\omega(n)$ — некоторая весовая функция, определяющая тип матрицы, а \mathbf{I} — единичная матрица.

В указанном виде задача была сформулирована в работе [5], в которой систематизированы

весовые функции наиболее значимых, с нашей точки зрения, вариантов решений, приведенных в таблице и рассмотренных подробно в работах [6, 7]. Для весовой функции $\omega(n) = n$ задача впервые была поставлена в работе [8], породив поиск и исследование матриц Адамара и матриц абсолютного максимума детерминанта (D-матриц) при отсутствии указанного квадратичного ограничения. В таблице t и k — целые числа, определяющие порядки соответствующих матриц и их весовые функции, а s и d — элементы каймы и диагонали соответственно.

В постановке Адамара наиболее существенно то, что ввиду целочисленного значения весовой функции решение — матрица оптимума — также целочисленная с элементами 1 и -1. Адамар установил [8], что экстремальные матрицы существуют для порядков $n = 1$, $n = 2$ и всех четных значений $n = 4t$. Следует заметить, что требование целочисленности решения вполне искусственное, оно не следует из существа задачи, а отражает интерес Адамара к квадратным матрицам Сильвестра с ортогональными столбцами и элементами 1 и -1.

Объяснение сложившейся позднее практики поиска целочисленных решений состоит в том, что вычислительные машины прошлого были относительно маломощны. Ортогональные последовательности (функции Уолша), порождаемые матрицами Адамара и состоящие из элементов 1

и -1, рассматривались как предпочтительные при программной реализации вычислений с ними. Для вычислений на современных процессорах такие ограничения не являются существенными.

Близкая к постановке Адамара задача впервые рассматривалась в работе [17], где, вопреки сложившимся традициям, было введено понятие матриц Адамара нечетных порядков, а элементы искомой оптимальной по детерминанту матрицы заданы диапазоном их значений $|a_{ij}| \leq 1$.

В работе [17] нет еще понятия весовой функции $\omega(n)$. Множитель единичной матрицы не задан жестко и служит объектом определения, как и у Адамара, обнаружившего, что для интересующих его вариантов решений $\omega(n) = n$. Для нечетных значений порядков эта функция иная и задана в работе [17] таблично для пяти стартовых нечетных порядков 3, 5, 7, 9, 11. При этом и веса, и элементы искомым матриц могут быть рациональными и иррациональными и иметь два или более значений — уровней [5, 18].

В работе [19] было обнаружено критичное значение нечетного порядка $n = 13$, после которого задача в принципе не разрешима на классах матриц с малым количеством отличных между собой элементов. В случаях, отмеченных Адамаром, значений элементов матрицы всего два. При нечетных значениях порядка число различных модулей элементов (модульных уровней)

■ Весовые функции наиболее значимых вариантов решений

Порядок матрицы n	Матрица	Возможные значения элементов матрицы	Функция веса $\omega(n)$	Литература
$4t$	Адамара	1, -1	n	[8]
$2t, 4t$	Белевича	1, -1, 0	$n - 1$	[9]
$t, 2t, 3t, 4t$	Взвешенная (Тоски — Себерри)	1, -1, 0	$n - k$	[10, 11]
$4t - 1$	Мерсенна	1, -b, где $b = \frac{t}{t + \sqrt{t}}$	$\frac{(n + 1) + (n - 1)b^2}{2} = 2t + (2t - 1)b^2$	[12, 13]
$4t - 2$	Эйлера*	1, -b, где $b = \frac{t}{t + \sqrt{2t}}$	$\frac{(n + 2) + (n - 2)b^2}{2} = 2t + (2t - 2)b^2$	[14]
$4t - 3$	Зейделя	1, -b, d, где $b = 1 - 2d, d = \frac{1}{1 + \sqrt{n}}$	$\frac{(n - 1)(1 + b^2)}{2} + d^2 = 2(t - 1)(1 + b^2) + d^2$	[5, 15]
$4t - 3$	Ферма	1, -b, s, где $q = n - 1 = 4u^2, p = q + \sqrt{q},$ $b = \frac{2n - p}{p} = 1 - \frac{2u - 1}{2u + 1} \times \frac{1}{u},$ $s = \frac{\sqrt{np} - 2\sqrt{q}}{p} = \frac{\sqrt{nu} - 1}{2u + 1} \times \frac{1}{\sqrt{u}}$	$1 + 4u^2s^2 = k + (q - k)b^2 + s^2,$ где $k = \frac{q - \sqrt{q}}{2} = 2u^2 - u$	[16]

* Для матрицы Эйлера четного порядка указаны значения двух ее блоков [6], в данном случае возможна инверсия знаков элементов сменой знака каждого из блоков.

матриц растет незначительно, почти линейно, но только до порядка 11 [18, 19]. Сходный проблемный порядок $n = 15$ исследован для D-матриц с бинарными элементами 1, -1 в работе [20], а уже при $n = 22$ точное решение неизвестно.

Мощность современных компьютеров недостаточна для нахождения оптимальной матрицы прямым перебором даже при столь узком ограничении, как бинарные значения элементов. Выделение весовых функций матриц локальных максимумов детерминанта позволяет сформулировать и реализовать алгоритм их поиска [5, 8, 19]. В настоящее время накоплен значительный опыт применения базового алгоритма [21], существенно изменивший точку зрения на его построение.

Базовый алгоритм и его недостатки

При разработке вычислительной схемы базового алгоритма в работах [5, 19] авторами недооценивалось значение *матрицы начального приближения*. Результаты вычислительных экспериментов показали [21], что для эффективности поиска матрица начального приближения должна нести некоторую существенную информацию о структуре искомой матрицы. Базовый алгоритм — это алгоритм второй стадии, корректирующий ошибки матрицы, вычисленной на первой стадии вычислительного процесса. Такая возможность игнорировалась в работе [19] в пользу матрицы оператора гильбертова преобразования, служившей источником первых полученных нами решений. Для матриц больших порядков и матриц локального максимума детерминанта [5] такая стратегия (выбор пусть хорошей, но одной стартовой матрицы) оказалась малоэффективной. Кроме выбора стартовой матрицы, необходимо организовать последующие вычисления так, чтобы они не разрушали предложенную структуру.

Такой подход противоречит введенной в работах [5, 19] перестановке столбцов искомой матрицы для повышения чувствительности процесса ортогонализации по методу Грамма — Шмидта [1, 2]. В программном комплексе [21] это противоречие было снято сохранением информации о перестановках и последующим реверсным восстановлением структуры матрицы по завершении вычислений. Произведенная вычислениями коррекция может быть как успешной, так и неуспешной. В последнем случае для эффективности поиска немаловажно распределение вычислительных затрат (максимального количества разрешенных итераций) между двумя стадиями выполнения алгоритма: выбором начального приближения и коррекцией ошибок начального приближения.

Неоправданная затянутасть либо первой, либо второй стадии вычислений негативно влияет на результативность поиска, что определяет важность рассмотрения этого вопроса.

Изменение вычислительной схемы алгоритма

В соответствии с вышеизложенными обстоятельствами опишем вычислительную схему обновленной версии алгоритма поиска матриц глобального и локального максимума детерминанта.

Стадия 1. Матричный генератор, целью работы которого является формирование матрицы начального приближения одной из следующих форм:

- циклической;
- бициклической;
- негациклической;
- бинегациклической;
- массива Вильямсона из четырех циклических или негациклических клеток;
- k -циклических или k -негациклических матриц с одинарной или двойной каймой.

Перечисленные формы привычны при поиске ортогональных матриц Адамара на порядках $n = 4k$, обладающих глобальным максимумом детерминанта. Кроме того, это могут быть квази-ортогональные матрицы порядков, отличных от адамаровых [5–7], структуры которых закладываются на стадии 1.

Матричный генератор формирует не одну матрицу начального приближения, как ранее в работах [5, 17], а множество матриц, обозначаемых как A . Матрицы сравниваемы между собой по квадратичной невязке $\xi = \|A^T A - \omega(n)I\|$, где I — единичная матрица; $\omega(n)$ — функция веса, зависящая от порядка n матрицы (см. функции веса в таблице и работах [6, 7]). Оценка качества матриц, связанных условием ортогональности их столбцов (строк), вполне естественна. Однако такие матрицы могут быть сколь угодно далеки от искомых оптимальных. Результат работы матричного генератора — множество матриц начального приближения заданной формы, из которых выбирается одна лучшая по квадратичной невязке, обозначаемая далее как стартовое приближение A_0 .

На генерацию матриц и выбор матрицы начального приближения отводится время, измеряемое, например, количеством циклов N_1 рандомизированного поиска. Безотносительно к алгоритму подготовки, в итерациях стадии 2 используются матрицы с нормированными столбцами (квадратичная норма каждого столбца матрицы A_0 равна 1).

Стадия 2. Ее основа — базовый алгоритм, описанный в работах [5, 17] и дополненный описываемыми далее процедурами. Реализация дан-

ной стадии начинается с этапа инициализации вектора $\mathbf{X}_0 = [0, 1, 2, \dots, n - 1]$ номеров реверсной перестановки столбцов. Для удобства программной реализации полагаем, что индексы столбцов нумеруются, начиная с нуля.

В общем вектор перестановок \mathbf{X}_k , например, может быть реализован как нижняя строка искомой матрицы \mathbf{A}_k , k — номер итерации, состоящей в выполнении указанных ниже процедур.

Процедура 1. Перестановка столбцов итерированной матрицы \mathbf{A}_k и элементов вектора реверсной перестановки \mathbf{X}_k в порядке убывания абсолютных значений максимальных элементов в столбцах. Благодаря сохраненной в векторе \mathbf{X}_k информации о всех перестановках при повторении процедуры на заключительном этапе итераций сохраняется возможность осуществить реверсный ход.

Процедура 2. Сжатие матрицы, т. е. ограничение норм элементов матрицы насыщением.

Пусть m — значение максимального по абсолютной величине элемента матрицы после предыдущей итерации. Абсолютные значения всех элементов матрицы понижаются (с сохранением их знаков) до величины $p_k m$, где $p_k \leq 1$.

Заметим, что ограничивать норму элементов матрицы можно как сверху, так и снизу, в зависимости от основной стратегии конкретной реализации.

Процедура 3. Стартовое значение p_0 масштабного множителя функции насыщения назовем коэффициентом начального сжатия.

Значение указанного коэффициента на старте задается (обычно) как 0,5 и увеличивается, приближаясь к единице, в процессе итераций пересчетом в виде $p_{k+1} = ap_k + b$, где $b = 1 - a$ и $a < 1$ (обычно 0,995). Для конкретной реализации коэффициент можно пересчитывать иначе, например, выбор рекурсии второго порядка для этого коэффициента отвечает дополнительной цели «раскачивания» матрицы пульсирующим сжатием.

Процедура 4. Ортогонализация сжатой матрицы по методу Грамма — Шмидта. Перестановка столбцов создает эффективное «зацепление» за максимально измененный в желаемом смысле вектор. Ортогонализация не меняет его направление и не восстанавливает, как это может быть в противном случае (без перестановки).

В результате выполнения текущей процедуры столбцы матрицы нормализуются, образуя единичные по норме орты.

Процедура 5. Принятие решения о переходе к процедуре 1 или завершении стадии 2 переходом к процедуре 6 по признакам достижения приемлемого качества решения, оцениваемого по многопараметрическому показателю.

Как правило, качественное решение отличается нулевым (или близким к нулю) значением

квадратичной невязки ξ_k . В качестве контролируемого параметра может использоваться адамова норма матрицы $h = m\sqrt{n}$, которая для искомых матриц принимает вполне конкретные значения [5].

Процедура 6. Завершение стадии 2 реверсной перестановкой столбцов с использованием вектора \mathbf{X}_k для восстановления их исходной нумерации. После этого производится оценка качества решения, включающая проверку формы матрицы. Например, при поиске матриц Белевича [2] важна не только ортогональность матрицы, но и наличие на диагонали нулевых элементов. Для циклических, бициклических и других видов матриц оценивается сохранение их структуры, при несохранении стадия 2 завершается возвратом к стадии 1.

Стадия 2 завершается также принудительно после исчерпания отведенного на нее количества итераций поиска N_2 .

Симметрии кодов матричного генератора

Матричный генератор придает формируемым им матрицам теплицеву или блочно-теplicеву структуру с возможными одинарной или двойной каймами. Такие «пространственные» структуры, симметричные относительно побочных диагоналей размещения элементов матрицы, разрешимы на семействах кодов (строках), обладающих явной или скрытой симметрией.

Определение 1. Симметричная последовательность элементов $[\mathbf{a} \ \mathbf{b}]$ состоит из фрагментов исходного $\mathbf{a} = [a_0, a_1, a_2, \dots, a_{v-1}]$ и реверсивного $\mathbf{b} = \text{flip}(\mathbf{a}) = [a_{v-1}, a_{v-2}, a_{v-3}, \dots, a_0]$ кодов длины v .

Определение 2. Кососимметричная последовательность элементов $[\mathbf{a} \ -\mathbf{b}]$ состоит из фрагментов исходного $\mathbf{a} = [a_0, a_1, a_2, \dots, a_{v-1}]$ и реверсного со сменой знака $-\mathbf{b} = \text{flip}(-\mathbf{a}) = [-a_{v-1}, -a_{v-2}, -a_{v-3}, \dots, -a_0]$ кодов длины v .

Для формирования кодов нечетной длины фрагменты могут содержать стартовый, финальный или промежуточный элемент или блоки элементов. Иными словами, о симметрии последовательности можно говорить и в том случае, когда исходный и реверсный коды дополнены разделяющими их или расширяющими кодовую последовательность элементами, размещенными в различных сочетаниях. Стоит отметить, что и реверсивный вид (флип), и смена знака могут заменяться на другие операции, поскольку идея симметрии связана не столько с операциями, сколько с идеей дополнения.

Рассмотрим обратимую операцию разделения некоторой последовательности \mathbf{d} на два внутренних блока четных \mathbf{a} и нечетных \mathbf{b} по индексу элементов: $[\mathbf{a} \ \mathbf{b}] = \mathbf{S}(\mathbf{d})$. Реверсивная операция

$d = R([a \ b])$ — действие, обратное к разделению индексов.

После операции $R([a \ b])$ симметричного кода симметрия его фрагментов может быть не видна, однако это не означает, что ее нет. Другим примером обратимой операции является операция циклического сдвига элементов последовательности влево или вправо. Таким образом, помимо явной формы, существуют *скрытые симметрии*, порожденные обратимыми операциями над симметричными кодами.

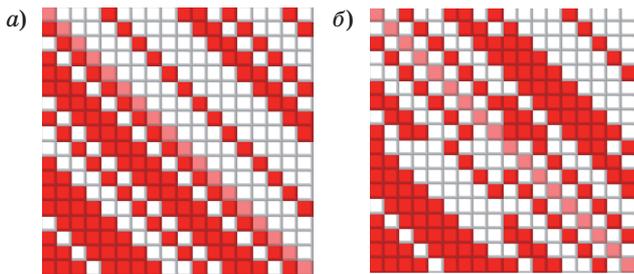
Симметричные коды широко встречаются при построении бициклических матриц, конференц-матриц или четырехблочных массивов Вильямсона [22]. Блочные конструкции имеет смысл рассматривать, если они стандартизованы и найдены посредством вычислений с привлечением значительных вычислительных ресурсов. Переход к более простым циклическим или негациклическим матрицам связан с выполнением $R([a \ b])$ образующих блоки кодов. Таким образом, при поиске матриц появляется необходимость в кодах, причем, возможно, с несколькими уровнями скрытой симметрии.

Если матрица с заданным типом «пространственной» структуры не разрешима для одной симметрии кодов, можно менять эту симметрию. Рассматриваемый подход — удобный источник классификаций решений по типам их симметрий.

Примеры матриц с элементами симметрии

Приведем несколько наглядных примеров, когда поиск матриц облегчается использованием перестановок, выявляющих скрытые виды симметрии.

Пример 1. На рис. 1, а показана негациклическая матрица Пэли [23] порядка 18, т. е. матрица с нулевой диагональю и остальными элементами 1 и -1, с ортогональными столбцами (строками). Эта матрица, на первый взгляд, не имеет симметрий, позволяющих облегчить поиск ее элементов, если они неизвестны.



■ Рис. 1. Портреты матрицы Пэли до (а) и после (б) разделения

Взглянем на ту же матрицу после применения к ней процедуры разделения четных и нечетных строк и столбцов (рис. 1, б).

Такую матрицу можно записать в виде двух возможных блочных форм — симметричной или кососимметричной:

$$C_1 = \begin{pmatrix} A & B \\ B^T & -A^T \end{pmatrix} \text{ или } C_2 = \begin{pmatrix} A & B \\ -B^T & A^T \end{pmatrix},$$

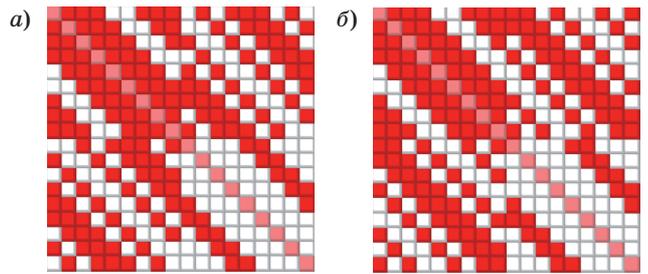
второй вариант получается инвертированием знаков двух нижних блоков.

Анализ выявляет скрытую симметрию, которая находит свое выражение в том, что блок A построен на кососимметричной последовательности элементов вида $[0 \ a \ -b]$. Второй блок B построен, напротив, на симметричной последовательности элементов вида $[a \ -1 \ b]$, разделительный элемент (это может быть 1 и -1) расположен посередине. Такого сорта симметрия — инвариант искомой матрицы, значительно облегчающий ее поиск для остальных разрешенных (четных) матрицам Пэли порядков.

После нахождения новой матрицы в форме C_2 реверсной перестановкой строк и столбцов она сводится к одноблочному негациклическому виду.

Пример 2. Преобразование вида $A = ZAZ$, $B = ZBZ$, где $Z = \text{diag}(1, -1, 1, -1, \dots)$, переводит негациклические блоки нечетного порядка в циклические (рис. 2, а и б): негациклическая матрица Пэли (см. рис. 1, б) преобразуется в циклическую ее форму [24] (см. рис. 2, а).

Двублочные циклические матрицы Пэли отличаются от негациклических тем, что ортогональность их строк и столбцов — инвариант циклического сдвига, поэтому несимметричную матрицу B можно симметризовать сдвигом, выводя средний разделительный элемент в начало матрицы. В данном случае мы видим, что, помимо матрицы со скрытой симметрией, существует еще один тип симметричных по обоим блокам матриц, выявляемый дополнительным преобразованием.



■ Рис. 2. Портреты циклической матрицы Пэли до (а) и после (б) симметрирования ее блоков

Заключение

Результативность рассмотренного в работе алгоритма сама по себе не зависит от того, заложены свойства симметрии в матричный генератор или нет, меняется только его производительность, оцениваемая числом итераций N_1, N_2 .

Если симметрии кодов не известны заранее, они выявляются на низких порядках для всего семейства матриц, что позволяет ускорить впоследствии нахождение матриц более высоких порядков.

Изучение результатов вычислительных экспериментов показало, что функция насыщения максимумов элементов, имеющая непрерывный или гистерезисный характер, приближает алгоритм к классическим образцам замкнутых нелинейных динамических систем с возможностью привлечения для анализа получаемых решений математического аппарата странных аттракторов. При таком подходе искомая итерациями матрица — аттрактор нелинейного динамического процесса, порожденный квадратическими уравнениями связи (квадратичная задача). Аналогия поясняет расщепление количества уровней матрицы [5], наблюдаемое при прохождении точек бифуркации с изменением параметров нелинейной системы. В данном случае существенным параметром, опреде-

ляющим качество решения, выступает порядок матрицы n .

Для критического нечетного значения порядка $n = 13$ (константа, близкая по смыслу к пороговому критерию Фейгенбаума [19]) наблюдается распад уровневой структуры матриц глобального максимума детерминанта. Решения становятся «фрактальными», что предопределяет переход к матрицам с локальным максимумом детерминанта.

Выделение (при поиске) как глобальных, так и локальных максимумов детерминанта матриц четных и нечетных порядков вводит в рассмотрение математический гиперобъект, порождающий все возможные ортогональные матрицы как его «срезы» на последовательно возрастающих порядках, начиная с тривиального первого.

Матрицы с небольшим числом отличающихся между собой по абсолютным величинам элементов существуют, в отличие от матриц Адамара (с элементами 1, -1), на всех значениях порядков [25, 26]. Более того, эксперимент показал, что матрицы со «слабыми оптимумами» (по детерминанту) несут, тем не менее, полную информацию о матрицах Адамара на сопредельных порядках. Располагая структурой таких матриц, как матрицы Мерсенна, Эйлера, Зейделя и Ферма [5–7, 12–19, 23, 24], можно строить и изучать свойства и конструкции матриц Адамара.

Литература

1. Фаддеев Д. К., Фаддеева В. Н. Вычислительные методы линейной алгебры. 4-е изд., стер. — СПб.: Лань, 2009. — 736 с.
2. Воеводин В. В., Кузнецов Ю. А. Матрицы и вычисления. — М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1984. — 320 с.
3. Тыртышников Е. Е. Матричный анализ и линейная алгебра. — М.: Изд-во МГУ, 2005. — 372 с.
4. Шарый С. П. Курс вычислительных методов: учеб. пособие. — Новосибирск: Новосиб. гос. ун-т, 2011. — 316 с.
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. Нормы обобщенных матриц Адамара // Вестник СПбГУ. Сер. 10. 2014. Вып. 2. С. 5–11.
7. Balonin N. A., Sergeev M. B. Quasi-Orthogonal Local Maximum Determinant Matrices. *Applied Mathematical Sciences*. 2015. Vol. 9. N 6. P. 285–293. doi 10.12988/ams.2015.4111000
8. Hadamard J. Résolution d'une Question Relative aux Déterminants. *Bulletin des Sciences Mathématiques*. 1893. Vol. 17. P. 240–246.

9. Belevitch V. Theorem of 2n-terminal Networks with Application to Conference Telephony//*Electrical Communication*. 1950. N 26. P. 231–244.
10. Olga Taussky. (1, 2, 4, 8)-sums of Squares and Hadamard Matrices// *Proc. Symp. Pure Math. Combinatorics*, Amer. Math. Soc., Providence, Rhode Island, 1971. Vol. 19. P. 229–233.
11. Jennifer (Seberry) Wallis. Orthogonal (0,1,-1)-matrices // *Proc. First Austral. Conf. Combinatorial Math.*, Newcastle, 1972. P. 61–84.
12. Балонин Н. А., Сергеев М. Б., Мироновский Л. А. Вычисление матриц Адамара — Мерсенна // Информационно-управляющие системы. 2012. № 5(60). С. 92–94.
13. Sergeev A. M. Generalized Mersenne Matrices and Balonin's Conjecture // *Automatic Control and Computer Sciences*. 2014. Vol. 48. N 4. P. 214–220. doi: 10.3103/S0146411614040063
14. Балонин Н. А., Сергеев М. Б. О двух способах построения матриц Адамара — Эйлера // Информационно-управляющие системы. 2013. № 1(62). С. 7–10.
15. Balonin N. A., Vostrikov A. A., Sergeev M. B. On Two Predictors of Calculable Chains of Quasi-Orthogonal Matrices // *Automatic Control and Computer Sciences*. 2015. Vol. 49. N 3. P. 153–158. doi: 10.3103/S0146411615030025

16. Балонин Н. А., Сергеев М. Б., Мироновский Л. А. Вычисление матриц Адамара — Ферма // Информационно-управляющие системы. 2012. № 6(61). С. 90–93.
17. Балонин Н. А., Мироновский Л. А. Матрицы Адамара нечетного порядка // Информационно-управляющие системы. 2006. № 3(22). С. 46–50.
18. Balonin N. A., Seberry J. Remarks on Extremal and Maximum Determinant Matrices with Moduli of Real Entries ≤ 1 // Информационно-управляющие системы. 2014. № 5(71). С. 2–4.
19. Балонин Н. А., Сергеев М. Б. М-матрицы // Информационно-управляющие системы. 2011. № 1(50). С. 14–21.
20. Orrick W. P. The Maximal $\{-1, 1\}$ -determinant of Order 15 (accepted for publication in *Metrika*). 2004. <http://arxiv.org/abs/math.CO/0401179> (дата обращения: 05.01.2014).
21. Балонин Ю. Н. Программный комплекс MMatrix-2 и найденные им М-матрицы // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2013. № 10(112). С. 58–64.
22. Williamson J. Hadamard's Determinant Theorem and the Sum of Four Squares // *Duke Math. J.* 1944. N 11. P. 65–81.
23. Balonin N. A., Djokovich D. Symmetry of Two Circulant Hadamard Matrices and Periodic Golay Pairs // Информационно-управляющие системы. 2015. № 3(76). С. 2–16. doi:10.15217/issn1684-8853.2015.3.2
24. Balonin N. A., Djokovich D. Negaperiodic Golay Pairs and Hadamard Matrices // Информационно-управляющие системы. 2015. № 5(78). С. 2–17. doi:10.15217/issn1684-8853.2015.5.2
25. Балонин Н. А. О существовании матриц Мерсенна 11-го и 19-го порядков // Информационно-управляющие системы. 2013. № 2(63). С. 89–90.
26. Балонин Н. А., Сергеев М. Б. К вопросу существования матриц Мерсенна и Адамара // Информационно-управляющие системы. 2013. № 5(66). С. 2–8.

UDC 519.614

doi:10.15217/issn1684-8853.2015.6.2

Initial Approximation Matrices in Search for Generalized Weighted Matrices of Global or Local Maximum Determinant

Balonin N. A.^a, Dr. Sc., Tech., Professor, korbendfs@mail.ru

Sergeev M. B.^a, Dr. Sc., Tech., Professor, mbse@mail.ru

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

Purpose: The goal is to demonstrate the importance of initial approximation matrices which describe the structure in the problems of search for orthogonal multilevel matrices of global or local maximum determinant. **Methods:** The search for matrices of global or local maximum determinant is performed by an iterative computational procedure focused on the minimization of the maximum absolute value of the elements of an orthogonal matrix, precomputing its initial approximation in a structured form given a priori. **Results:** The proposed approach which, at the first computational stage, takes into account the matrix structure and symmetry, significantly improves the efficiency of the search for row- or column-orthogonal generalized weighted matrices. It is expedient to consider both explicit and implicit symmetries of the matrices. Examples are given of hidden matrix symmetries, and the respective mappings are shown equivalent in respect to the determinant value. **Practical relevance:** Generalized weighted matrices of global or local maximum determinant are orthogonal and have a direct practical value for the problems of error-correcting coding, video compression and masking.

Keywords — Numerical Methods, Orthogonal Matrices, Weighted Matrices, Hadamard Matrices, Cyclic Matrices, Negacyclic Matrices, Birculant Matrices.

References

1. Faddeev D. K., Faddeeva V. N. *Vychislitel'nye metody lineinoy algebrы* [Computational Methods of Linear Algebra]. Saint-Petersburg, Lan' Publ., 2009. 736 p. (In Russian).
2. Voevodin V. V., Kuznetsov Iu. A. *Matritsy i vychisleniia*. [Matrices and Calculations]. Moscow, Nauka Publ., Glavnaia redaktsiia fiziko-matematicheskoi literatury, 1984. 320 p. (In Russian).
3. Tyrtushnikov E. E. *Matrichnyi analiz i lineinaia algebra* [Matrix Analysis and Linear Algebra]. Moscow, Moskovskii gosudarstvennyi universitet Publ., 2005. 372 p. (In Russian).
4. Sharyi S. P. *Kurs vychislitel'nykh metodov* [The Course of Computational Methods]. Novosibirsk, Novosibirskii gosudarstvennyi universitet Publ., 2011. 315 p. (In Russian).
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. The Generalized Hadamard Matrix Norms. *Vestnik SPbGU*. Ser. 10, 2014, iss. 2, pp. 5–10 (In Russian).
7. Balonin N. A., Sergeev M. B. Quasi-Orthogonal Local Maximum Determinant Matrices. *Applied Mathematical Sciences*, 2015, vol. 9, no. 6, pp. 285–293. doi 10.12988/ams.2015.4111000
8. Hadamard J. Résolution d'une Question Relative aux Déterminants. *Bulletin des Sciences Mathématiques*, 1893, vol. 17, pp. 240–246 (In French).
9. Belevitch V. Theorem of 2n-terminal Networks with Application to Conference Telephony. *Electrical Communication*, 1950, no. 26, pp. 231–244.
10. Olga Taussky. (1, 2, 4, 8)-sums of Squares and Hadamard Matrices. *Proc. Symp. Pure Math. Combinatorias*, Amer. Math. Soc., Providence, Rhode Island, 1971, vol. 19, pp. 229–233.
11. Jennifer (Seberry) Wallis. Orthogonal (0,1,-1)-matrices. *Proc. First Austral. Conf. Combinatorial Math.*, Newcastle, 1972, pp. 61–84.
12. Balonin N. A., Sergeev M. B., Mironovsky L. A. Calculation of Hadamard–Mersenne Matrices. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2012, no. 5(60), pp. 92–94 (In Russian).

13. Sergeev A. M. Generalized Mersenne Matrices and Balonin's Conjecture. *Automatic Control and Computer Sciences*, 2014, vol. 48, no. 4, pp. 214–220. doi: 10.3103/S0146411614040063
14. Balonin N. A., Sergeev M. B. Two Ways to Construct Hadamard–Euler Matrices. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2013, no. 1(62), pp. 7–10 (In Russian).
15. Balonin N. A., Vostrikov A. A., Sergeev M. B. On Two Predictors of Calculable Chains of Quasi-Orthogonal Matrices. *Automatic Control and Computer Sciences*, 2015, vol. 49, no. 3, pp. 153–158. doi: 10.3103/S0146411615030025
16. Balonin N. A., Sergeev M. B., Mironovsky L. A. Calculation of Hadamard–Fermat Matrices. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2012, no. 6(61), pp. 90–93 (In Russian).
17. Balonin N. A., Mironovsky L. A. Hadamard Matrices of Odd Order. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2006, no. 3(22), pp. 46–50 (In Russian).
18. Balonin N. A., Seberry J. Remarks on Extremal and Maximum Determinant Matrices with Moduli of Real Entries ≤ 1 . *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2014, no. 5(71), pp. 2–4.
19. Balonin N. A., Sergeev M. B. M-matrices. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2011, no. 1(50), pp. 14–21 (In Russian).
20. Orrick W. P. *The Maximal $\{-1, 1\}$ -determinant of Order 15* (accepted for publication in *Metrika*). 2004. Available at: <http://arxiv.org/abs/math.CO/0401179> (accessed 05 January 2014).
21. Balonin Yu. N. The Software Complex MMatrix-2 and Searched Minimax Matrices. *Vestnik komp'iuternykh i informatsionnykh tekhnologii* [Herald of Computer and Information Technologies], 2013, no. 10(112), pp. 58–64 (In Russian).
22. Williamson J. Hadamard's Determinant Theorem and the Sum of Four Squares. *Duke Math. J.*, 1944, no. 11, pp. 65–81.
23. Balonin N. A., Djokovic D. Z. Symmetry of Two Circulant Hadamard Matrices and Periodic Golay Pairs. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2015, no. 3(76), pp. 2–16. doi:10.15217/issn1684-8853.2015.3.2 (In Russian).
24. Balonin N. A., Djokovic D. Z. Negaperiodic Golay Pairs and Hadamard Matrices. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2015, no. 5(78), pp. 2–17. doi:10.15217/issn1684-8853.2015.5.2
25. Balonin N. A. Existence of Mersenne Matrices of 11th and 19th Orders. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2013, no. 2(63), pp. 89–90 (In Russian).
26. 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).

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.

АЛГОРИТМ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ ПЕРЕДАТОЧНОЙ ФУНКЦИИ И ОДНОКЛАССОВОЙ КЛАССИФИКАЦИИ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ АНОМАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ДАМБ

А. П. Козионов^{а, б}, инженер, аспирант

А. Л. Пяйт^а, ведущий инженер, канд. техн. наук

И. И. Мохов^а, ведущий эксперт-исследователь

Ю. П. Иванов^б, канд. техн. наук, доцент

^аООО Сименс, департамент корпоративных технологий, Санкт-Петербург, РФ

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

Постановка проблемы: как правило, мониторинг состояния дамб с использованием датчиков, установленных в дамбу, заключается в сравнении измерений датчиков с заранее определенными пороговыми значениями, полученными в результате анализа или моделирования структуры дамбы. Этот способ позволяет обнаружить лишь простые случаи разрушения дамбы, например переливание гребня дамбы. Более сложные случаи, вызванные процессами внутренней эрозии, такой способ обнаружить не позволяет. **Цель:** разработка и апробация алгоритма обнаружения аномального состояния дамбы, вызванного процессами внутренней эрозии. **Результаты:** предлагаемый алгоритм обнаружения аномального состояния основан на моделировании передаточной функции между измеряемыми сигналами уровня воды и порового давления внутри дамбы. Одноклассовый классификатор «нейронные облака» используется для оценки нелинейной, нечеткой функции принадлежности ошибки модели к области нормального состояния. Обучение классификатора «нейронные облака» производится на исторических данных о нормальном поведении дамбы, полученных с датчиков, установленных в дамбу. Нечеткий выход классификатора, изменяющийся от 0 до 1, позволяет давать оценку близости текущего состояния дамбы к аномальному. Апробация алгоритма проводилась на реальных данных, полученных в ходе натурного эксперимента. **Практическая значимость:** результаты исследований и алгоритмические решения использованы компанией «Сименс» в компоненте искусственного интеллекта при разработке системы мониторинга состояния дамб.

Ключевые слова — обнаружение аномалий, мониторинг состояния дамб, интеллектуальная обработка сигналов, передаточная функция, нейронные облака, одноклассовая классификация.

Введение

В настоящее время более чем две трети европейских городов постоянно находятся под риском затопления. Число зарегистрированных наводнений увеличилось в четыре раза по сравнению с 80-ми годами XX века [1]. Изменение климата и быстрая урбанизация еще сильнее усугубляют проблему.

Большое число наводнений вызвано прорывом систем защиты от наводнений — дамб и плотин [2]. Например, в Нидерландах с 1134 по 2006 г. было зарегистрировано примерно 1735 случаев разрушения дамб [3]. В Европе существует несколько проектов, направленных на исследование и разработку систем контроля защиты от наводнений: FLOODsite [4], FloodControl 2015 [5], UrbanFlood [6]. Одним из важнейших элементов подобных систем является система мониторинга состояния дамб.

Исторически мониторинг дамб осуществляется инспекторами, которые обходят тысячи километров дамб. Каждый участок дамбы проверяется один раз в несколько лет. Современные технологии позволяют осуществлять непрерывный

мониторинг состояния дамбы с использованием технологий дистанционных измерений.

Проблема мониторинга состояния насыпных дамб заключается в сложном поведении дамбы и, как следствие, измеряемых параметров системы. Это влечет необходимость детального исследования объекта мониторинга и моделирования большого числа возможных сценариев разрушения дамбы, что требует больших затрат и не всегда возможно.

В 2012 г. в рамках исследовательской программы IJkDijk [7] была проведена серия экспериментов, направленных на исследование механизмов разрушения дамб, средств предотвращения разрушения дамб, систем и датчиков для мониторинга состояния дамб, а также алгоритмов для обнаружения аномального состояния дамб. Для экспериментов было сооружено три дамбы, каждая имела свое название: «Южная дамба», «Западная дамба», «Восточная дамба».

В настоящей работе авторами представлен алгоритм обнаружения аномального состояния дамбы на основе модели передаточной функции (ПФ) между сигналами уровня воды и порового давления (давления воды в порах почвы) в дамбу.

Апробация алгоритма проведена на реальных данных эксперимента по анализу влияния процессов эрозии на устойчивость дамбы, полученных в ходе эксперимента «Восточная дамба».

Подход к обнаружению аномального состояния дамб

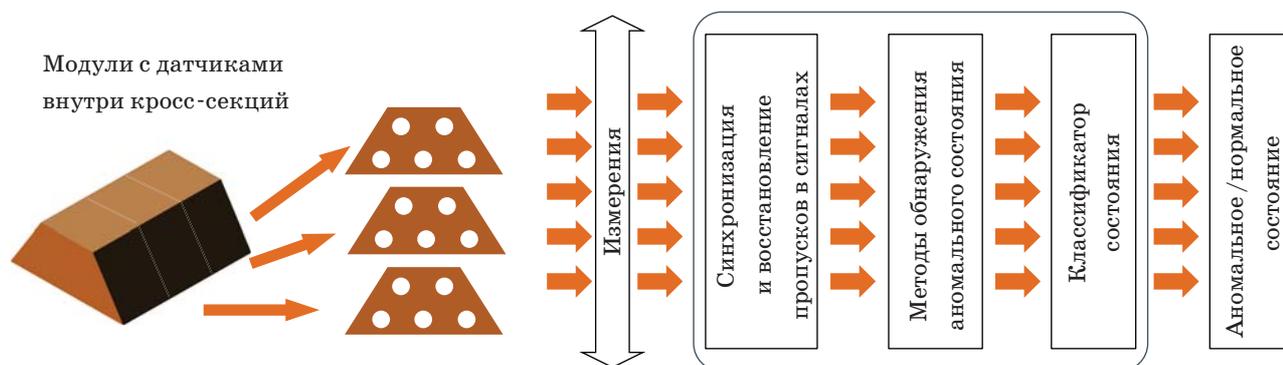
Мониторинг состояния дамбы осуществляется путем анализа измерений, собранных с сети различных датчиков, установленных в дамбу, таких как датчики порового давления и температуры, инклинометры. Задача системы мониторинга — обнаружить аномальное состояние дамбы. Под аномальным состоянием (поведением) подразумевается отклонение от нормального состояния объекта, которое может привести к неисправности или разрушению дамбы [8]. Датчики устанавливаются в каждую кросс-секцию дамбы. Такое деление объекта мониторинга позволяет локализовать аномальное состояние и предотвращает избыточность измерений. Применение сетей датчиков как части системы раннего предупреждения в рамках проекта UrbanFlood описано в работах [9–11].

Различные типы измеряемых параметров обрабатываются в соответствии с их свойствами. Например, в случае датчиков порового давления необходимо учитывать зависимость между измерениями порового давления в разных точках дамбы. Для анализа и мониторинга зависимостей между сигналами можно использовать ПФ или методы, которые позволяют оценивать границы областей нормального поведения. В первом случае существует проблема идентификации ПФ, а также проблема устойчивости [12]. Во втором случае алгоритмы, основанные на оценивании допусков для параметров, не имеют проблем, связанных с устойчивостью и идентификацией, но не обнаруживают скрытые в сигналах зависимости, а лишь позволяют обнаружить превышение сигналами критических значений. Следствием является то, что аномальные состояния, прояв-

ляющиеся в динамике сигналов, не будут обнаружены. Ранее авторами был представлен алгоритм на основе применения граничных методов для совместного анализа реальных сигналов и сигналов, сгенерированных моделью на основе метода конечных элементов [13], но данный алгоритм требует построения модели дамбы и моделирования сценариев ее поведения, что не всегда возможно.

Основная идея предлагаемого подхода заключается в применении методов обнаружения аномального поведения, которые обучаются на «сырых» и (или) предварительно обработанных данных [10, 14]. При этом данные системы контроля состояний дамб могут содержать пропуски, вызванные сбоями системы сбора данных и другими факторами. Такие пропуски могут иметь протяженность от нескольких минут до нескольких дней [14, 15]. Обнаружение аномального состояния состоит из трех этапов (рис. 1). Первый этап — сбор данных с датчиков. Второй этап — их предварительная обработка, в нашем случае — восстановление пропусков в данных алгоритмом на основе метода «Гусеница-SSA» (Singular Spectrum Analysis — спектрально-сингулярный анализ) или модели авторегрессии [14, 15]. На третьем этапе с помощью алгоритма обнаружения аномального состояния извлекается информация из сигналов (признаки). Далее алгоритмы классификации, основанные на методах машинного обучения, определяют состояние дамбы.

Поскольку для дамбы зачастую доступны лишь данные о нормальном состоянии, классификацию состояния дамбы логично производить, оценивая степень принадлежности сигналов датчиков к области нормального состояния. Для решения такой задачи применимы алгоритмы одноклассовой классификации, основанные на оценке принадлежности сигнала к одному заданному классу. В нашем случае это область «исторических» измерений, соответствующих нормальному состоянию дамбы.



■ Рис. 1. Этапы обнаружения аномального состояния дамбы

Метод «нейронные облака»

К одним из наиболее быстроразвивающихся и перспективных методов классификации относятся методы на основе машинного обучения. Для обучения классификатора используются лишь данные о нормальном поведении сигнала, данные о видах аномального поведения недоступны. В качестве такого метода в работе рассматривается классификатор «нейронные облака» [15].

Наиболее часто для задач обнаружения аномалий используют различные метрики расстояний (евклидову, Махаланобиса и др.) [16], методы на основе оценки плотности вероятности данных, например гауссовы смеси (Gaussian Mixture Models — GMM) [16], которые оценивают плотность вероятности для данных, соответствующих нормальному состоянию. Общий недостаток этих методов в том, что они сами по себе не являются классификаторами, и их выход все равно нужно каким-то образом классифицировать [17]. Также стоит отметить одноклассовый метод опорных векторов (one-class SVM — Support Vector Machines) [16]. Недостаток метода в том, что он оценивает четкую границу класса, которую нельзя перенастроить (скорректировать) во время использования классификатора, а лишь только при новом переобучении.

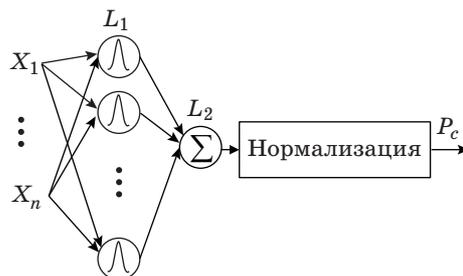
«Нейронные облака» оценивают нелинейную, нечеткую функцию принадлежности (инкапсулятор) данных к области нормального состояния для исходного «нормального» множества признаков. Затем функция принадлежности используется для оценки принадлежности новых экземпляров данных к области нормального поведения. Выход «нейронных облаков» — значение от 0 до 1. Значения, близкие к 1, отражают нормальное поведение, а близкие к 0 — аномальное. Таким образом, «нейронные облака» позволяют давать оценку близости текущего состояния к аномальному, что может быть использовано при принятии решения.

Оценка функции принадлежности состоит из двух шагов: кластеризации данных методом АКМ (advanced k-means, «улучшенный алгоритм k-средних») и аппроксимации кластеров радиальными базисными функциями (РБФ). Смесь РБФ можно представить в виде нечеткой нейронной сети.

Метод АКМ — это модификация хорошо известного метода k-средних с возможностью адаптивного расчета оптимального числа кластеров при заданном максимальном числе кластеров (центроидов). АКМ состоит из трех шагов, выполняющихся итеративно.

Шаг 1. Задается начальное максимальное и минимальное число центроидов.

Шаг 2. Вызывается алгоритм k-средних.



■ **Рис. 2.** «Нейронные облака»: L_1 — РБФ; L_2 — суперпозиция РБФ; P_c — значение функции принадлежности

Шаг 3. Анализируются центроиды, полученные после алгоритма k-средних. Добавляется или убирается центроид, исходя из следующих условий:

- если дистанция до данных выше заданной, то создается новый центроид;
- если кластер состоит из меньшего числа точек, чем задано, то он убирается;
- если расстояние между центроидами меньше заданного, то кластеры объединяются;
- останов, если первые три условия не выполняются.

Выход алгоритма АКМ — это центроиды кластеров, представляющих собой нормальное состояние объекта. После того как все центроиды получены, данные инкапсулируются функцией принадлежности. Для данных задачи используются РБФ

$$R_i = e^{-\frac{|x-m_i|}{2\sigma^2}},$$

где x — входные данные; m_i — среднее (центр) РБФ; σ — среднеквадратическая ошибка (СКО) (ширина) РБФ.

Центроиды, полученные от АКМ, становятся центрами соответствующих РБФ. Сумма всех колоколов дает функцию принадлежности (рис. 2). Нормализация применяется для того, чтобы получить выходное значение функции принадлежности в интервале от 0 до 1.

Алгоритм обнаружения аномального состояния дамбы на основе моделирования ПФ между сигналами

Аномалии в состоянии дамбы, вызванные эрозией (внутренней или внешней), могут быть обнаружены датчиками порового давления. Если, например, переливание гребня дамбы может быть обнаружено при сравнении уровня воды с пороговым, то более сложные аномалии, вызванные процессами внутренней эрозии, могут быть обнаружены путем более сложного анализа зависимостей между сигналами уровня воды и давления воды в порах почвы (порового давления).

Для анализа зависимостей между сигналами можно использовать ПФ, которые выражают связь между входом и выходом системы. Передаточные функции могут быть как линейные, так и нелинейные (нейронные сети, нечеткие ПФ, полиномиальные, вейвлетные и т. д.). Применение линейной ПФ имеет ряд преимуществ: это относительно простота модели; возможность априорной оценки устойчивости модели по средствам анализа ее коэффициентов (что не получится сделать для нелинейной модели); при оценивании коэффициентов линейной модели есть только одно оптимальное решение, в отличие, например, от нейронных сетей, где может быть несколько минимумов при одной и той же структуре модели. Поэтому если зависимость адекватно аппроксимируется линейной ПФ, то предпочтительно использовать ее.

Модель линейной ПФ — это дифференциальный оператор, выражающий связь между входом и выходом линейной стационарной системы. Модель ПФ может быть записана в виде разностного уравнения [17]

$$y(t) = b_1 u(t - n_k) + \dots + b_{n_b} u(t - n_k - n_b + 1) - a_1 y(t - 1) - \dots - a_n y(t - n_a) + e(t),$$

где $y(t)$ — выход системы (сигнал); $u(t)$ — вход системы; t — отсчеты времени; a и b — коэффициенты выхода и входа соответственно; n_a и n_b — количество коэффициентов выхода и входа; n_k — коэффициент задержки входа модели.

Таким образом, данная модель позволяет оценить линейную зависимость выхода системы от входа и предыдущих значений выхода. В иностранной литературе эта модель часто называется ARX-model (autoregressive exogenous model — авторегрессионная модель с внешними входами) [18]. Краткая запись модели ARX(n_a, n_b, n_k) означает, что модель имеет n_a коэффициентов выхода, n_b коэффициентов входа с задержкой в n_k .

Идентификация модели (обучение модели) заключается в нахождении наилучших порядков и коэффициентов модели. Обучается модель на исторических данных сигналов, которые в свою очередь разбиваются на два множества: множество для обучения модели (training set, обычно

принимается 80 % данных) и множество для проверки качества модели (validation set, обычно принимается 20 % данных). Часто для нахождения значений коэффициентов a и b используется метод наименьших квадратов.

В качестве критерия для выбора наилучшей модели можно использовать СКО оценки

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N_{VAL}} \sum_{t=1}^N (y(t) - \hat{y}(t))^2},$$

где N_{VAL} — количество измерений, используемых в множестве для проверки; $\hat{y}(t)$ — оценка моделью значения $y(t)$.

Другой наиболее часто используемый критерий — информационный критерий Акайке [19], который, в отличие от среднеквадратичной модели, накладывает штраф на размерность модели, что позволяет на выходе получить компактную модель с качеством, приемлемым для решения задачи:

$$AIC = \ln \sigma^2 + \frac{2d}{N_{TR}},$$

где σ — СКО оценки; d — количество параметров модели; N_{TR} — количество измерений, используемых в обучающем множестве.

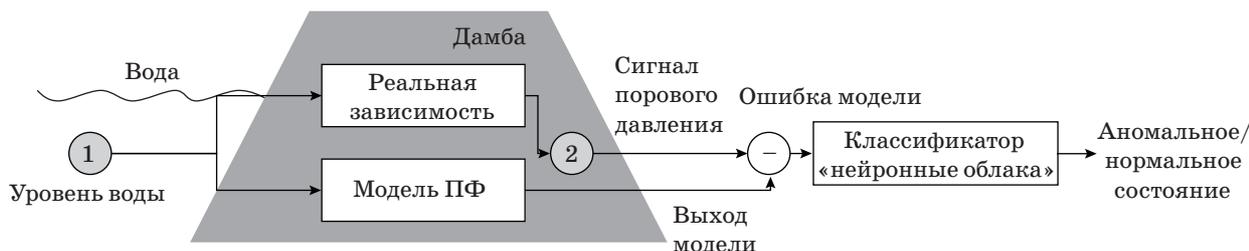
Также используется метрика R^2 , которая рассчитывается следующим образом:

$$R^2 = 1 - \frac{\sigma^2}{\sigma_y^2},$$

где σ — дисперсия ошибки оценки пропущенных значений; σ_y — СКО сигнала. С уменьшением дисперсии ошибки оценки R^2 стремится к 1, с увеличением ошибки оценки R^2 стремится к отрицательным значениям. Таким образом, чем ближе R^2 к 1, тем выше точность модели.

Идентификацию оптимальных параметров моделей можно провести методом перебора, оценивая на каждой итерации значение критерия качества модели.

Идея настоящего алгоритма обнаружения аномального состояния дамбы заключается в оценивании ПФ между сигналами датчиков, установленных в дамбу (рис. 3). Модель оценивается по данным о нормальном состоянии дамбы. Далее



■ Рис. 3. Схема алгоритма

во время мониторинга дамбы проверяется, сохраняется зависимость или нет. Если зависимость не сохраняется и ошибка модели увеличивается, то это — сигнал аномального состояния. Ошибка модели вычисляется как разность между реальным значением сигнала и значением, оцененным моделью для данного момента времени.

В настоящей работе в качестве входа модели будет использоваться сигнал уровня воды, а выходом будет сигнал порового давления. Таким образом, если при изменении уровня воды изменение реального порового давления будет не совпадать с выходом модели и ошибка будет увеличиваться, то это — признак аномального состояния дамбы. Для оценки близости ошибки модели к аномальному состоянию мы будем использовать метод «нейронные облака».

Описание эксперимента

Эксперимент «Восточная дамба» был разработан для исследования механизмов разрушения дамбы (рис. 4, слева), вызванных эрозией [7]. Дамба состояла из слоев песка и глины (рис. 5). В дамбу была установлена сеть модулей многопараметрических датчиков, измеряющих поровое давление, отклонение (инклинометры) и температуру [20]. Датчики были установлены в песчаный слой в два ряда вдоль внешнего откоса дамбы.

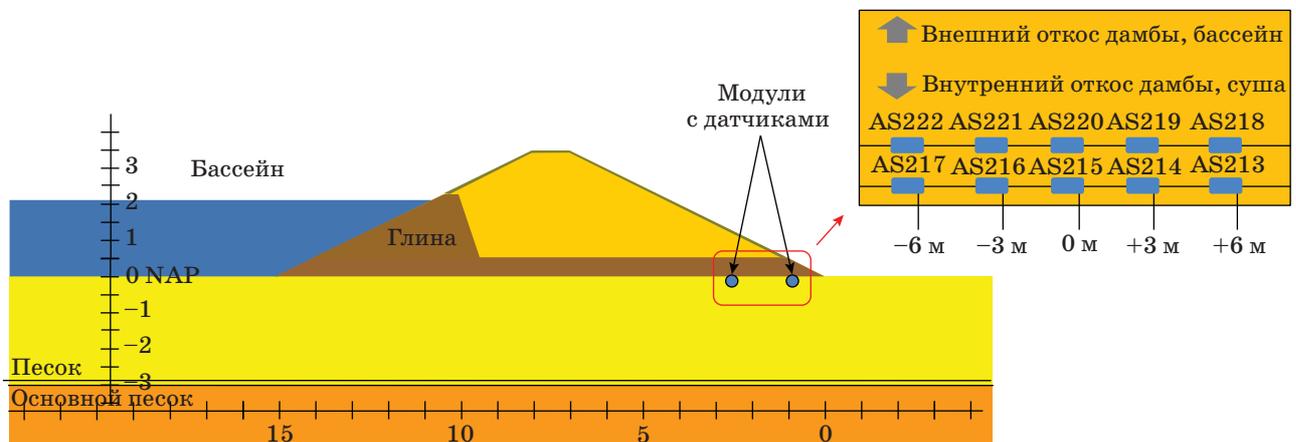
Первый ряд: датчики AS 218–AS 222; второй ряд: датчики AS 213–AS 217. Также измерялся уровень воды в бассейне.

В течение эксперимента уровень воды в бассейне увеличивался ступенчато (рис. 6, а), что приводило к ступенчатому нарастанию порового давления $P_{п}$, измеряемого датчиками (рис. 6, б).

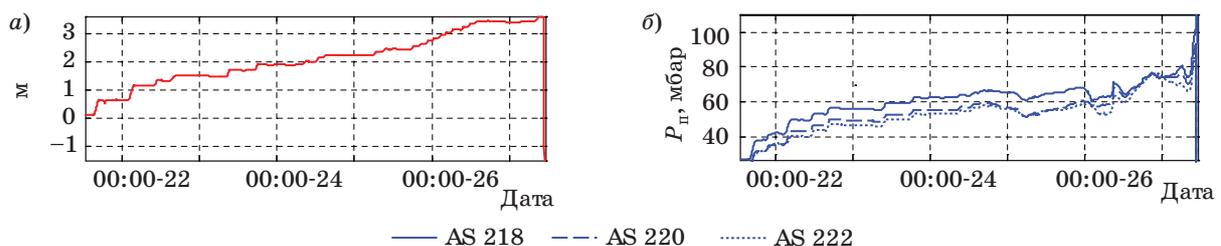
Эксперимент состоял из трех этапов. Первый этап — повышение уровня воды в бассейне для моделирования процесса вымывания грунта, если процесс вымывания грунта не начался; второй этап — повышение уровня воды в целях модели-



■ Рис. 4. «Восточная дамба» (слева) и «Западная дамба» (справа) после окончания экспериментов



■ Рис. 5. Схема дамбы



■ Рис. 6. Измерения датчика уровня воды в бассейне (а) и датчиков порового давления (б); формат даты: ЧЧ:ММ-ДД

рования переливания воды через слой глины; третий этап — увеличение уровня воды в целях переливания воды через гребень дамбы.

Эксперимент начался 21.08.2012 в 15:20. Первые просачивания воды и вымывание грунта были обнаружены 26.08.2012 в 15:17, в этот момент уровень воды достигал трех метров. Трещины вдоль гребня дамбы, вызванные эрозией, появились 27.08.2012 в 10:10, в этот момент уровень воды в бассейне был равен 3,2 м.

Прорыв дамбы произошел возле датчиков AS 218 и AS 213. Причиной разрушения дамбы явилось внутреннее переливание (переливание внутреннего глиняного слоя), вызванное процессами внутренней эрозии и вымывания грунта.

Моделирование алгоритма на экспериментальных данных

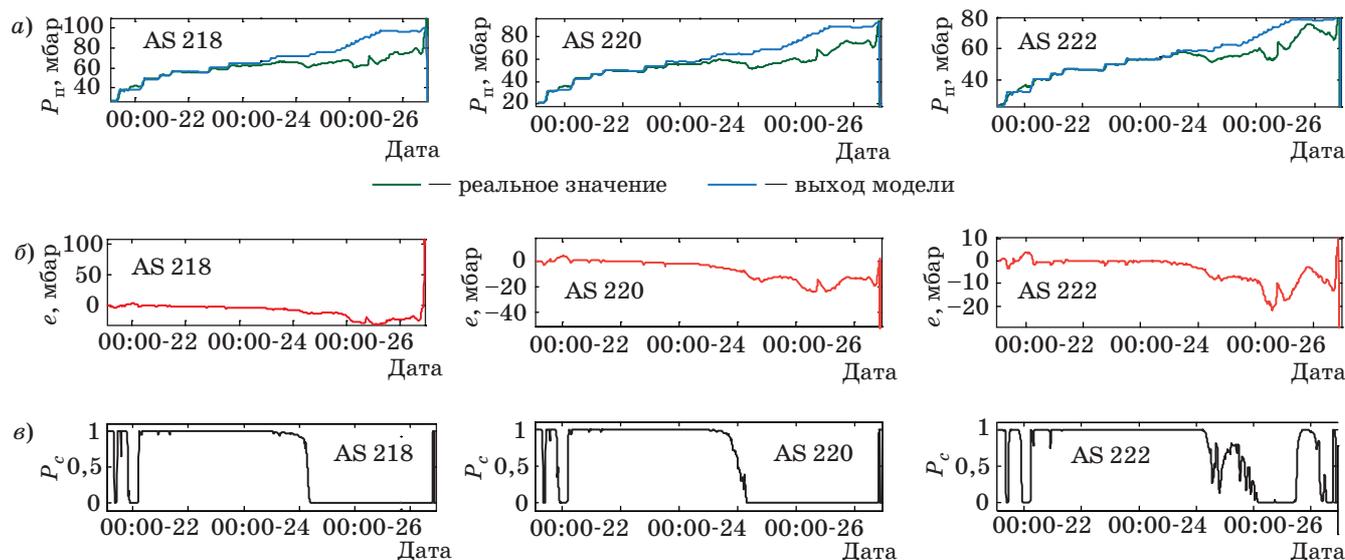
Моделирование алгоритма проводилось на реальных данных, полученных от трех пар датчиков в результате эксперимента. Входом ПФ был уровень воды в бассейне, выходом — измерения датчиков порового давления P_{II} AS 218 – AS 222 (рис. 7, а), частота измерений — один раз в две минуты. Измерения датчиков не содержали пропусков, поэтому не потребовалось применять алгоритмы восстановления пропусков.

В соответствии с алгоритмом поровое давление было смоделировано с помощью ПФ. Для обучения ПФ были выбраны первые 25 % измерений датчиков (сделано это с целью не включить последующее развивающееся аномальное состояние в обучающее множество). Идентификация модели была проведена посредством перебора: для

порядков n_a и n_b — от 1 до 50, для порядка задержки n_k — от 0 до 50, — и расчета информационного критерия Акайке; оптимальной моделью оказалась модель с порядками $n_a = 0$, $n_b = 1$, $n_k = 5$. Низкий порядок модели может быть объяснен квазистационарным поведением сигналов без колебаний, соответствующих, например, приливам и отливам воды [12]. Параметр задержки n_k , равный пяти отсчетам (10 мин), означает, что изменение уровня воды влияет на изменение порового давления в датчиках с задержкой в 10 мин. Значения СКО и модели, критерия Акайке и R^2 соответственно равны: $\sigma = 1,37$ мбар, $AIC = 0,63$, $R^2 = 0,98$. Высокие значения показателей точности говорят о том, что линейная модель адекватно описывает зависимости.

Для всех пар датчиков разница e между реальным и смоделированным (ошибка модели) значениями увеличивается с развитием аномального состояния после 24.08.2012 (внутренняя эрозия, рис. 7, б). Для обучения нейронных облаков использовались первые 25 % отсчетов вектора ошибки модели для оценки функции принадлежности к нормальному поведению ошибки модели. Значение функции принадлежности «нейронных облаков» приближается к 0 с развитием аномалии. Порог для значения функции принадлежности нейронных облаков, ниже которого предполагается аномальное состояние дамбы, был принят равным 0,8.

Два первых интервала, где значение функции принадлежности около 0, интерпретированы как неизвестное поведение в начале эксперимента. Последующее увеличение ошибки модели e (см. рис. 7, б) и падение значения функции принад-



■ Рис. 7. Результат обнаружения аномального поведения с использованием ПФ: а — сравнение реальных измерений и смоделированных; б — ошибка моделирования; в — значения функции принадлежности «нейронных облаков»

лежности к 0 соответствуют аномальному состоянию дамбы. Для датчиков AS 218 и AS 222 после 25.08.2012 в 2:00 значение функции принадлежности уменьшается до 0,8 и далее до 0, для датчика AS 220 — после 24.08.2012 в 23:00 (рис. 7, в).

Поскольку прорыв дамбы произошел 27.08.2012 в 11:30, а алгоритм позволил обнаружить критическое состояние 25.08.2012 в 2:00, это говорит о том, что аномальное состояние было спрогнозировано за ~55 ч до начала разрушения дамбы, в то время как визуально вымывание грунта было обнаружено 26.08.2012 в 15:17, что соответствует ~37 ч до начала разрушения дамбы.

Заключение

Серия экспериментов IJkDijk была проведена в августе–сентябре 2012 года в Нидерландах. Различные типы датчиков были апробированы во время тестов All-in-one Sensor Validation Test (AIO-SVT) для проверки их применимости и чувствительности к обнаружению различных механизмов разрушения дамб. В настоящей работе рассматривались измерения датчиков порового давления.

Авторами представлено применение алгоритма обнаружения аномального состояния дамбы на основе моделирования ПФ между сигналами и классификации ошибки модели методом «нейронные облака». Алгоритм был разработан в рамках общего подхода к обнаружению аномального

состояния дамб. Апробация алгоритма проводилась на реальных экспериментальных данных. В работе показано, что моделирование ПФ между уровнем воды и поровым давлением позволяет обнаружить аномальное состояние дамбы, вызванное процессами внутренней эрозии, на начальных этапах его зарождения. Высокие значения показателей точности говорят о том, что линейная модель адекватно описывает зависимости в сигналах. Предлагаемый алгоритм позволил обнаружить аномальное состояние дамбы за ~55 ч до ее прорыва, в то время как визуально вымывание грунта было обнаружено за ~37 ч до прорыва дамбы.

Стоит отметить, что алгоритм имеет ограничения. Во-первых, не всегда можно идентифицировать адекватную модель ПФ в случае сложных зависимостей. Во-вторых, модель может иметь большую ошибку из-за того, что текущий вид поведения сигналов отсутствовал в обучающем множестве, и, как следствие, это может привести к ложному обнаружению аномального состояния. Для предотвращения таких ложных срабатываний необходимо периодически либо адаптивно, с увеличением числа ложных срабатываний, переобучать модель.

Результаты исследований и алгоритмические решения использованы компанией «Сименс» в компоненте на основе искусственного интеллекта при разработке системы мониторинга состояния дамб.

Литература

1. Flood — Data and Statistics. <http://www.prevention-web.net/english/hazards/statistics/?hid=71> (дата обращения: 01.08.2015).
2. Wohl E. Inland Flood Hazards: Human, Riparian, and Aquatic Communities. — Cambridge, Cambridge University Press, 2000. — 518 p.
3. Baars S., Kempen M. The Causes and Mechanisms of Historical Dike Failures in the Netherlands. — Official Publication of the European Water Association, 2009. — 14 p.
4. FLOODsite project. <http://www.floodsite.net/> (дата обращения: 01.08.2015).
5. FloodControl 2015. <http://www.floodcontrol2015.com/> (дата обращения: 01.08.2015).
6. UrbanFlood project. <http://www.urbanflood.eu> (дата обращения: 01.08.2015).
7. IJkDijk project. <http://www.floodcontrolijkdijk.nl/> (дата обращения: 01.08.2015).
8. Isermann R. Fault-Diagnosis Systems: an Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance. — Berlin, Berlin Springer, 2006. — 475 p.
9. Krzhizhanovskaya V. V., et al. Flood Early Warning System: Design, Implementation and Computational Modules // *Procedia Computer Science*. 2011. N 4. P. 106–115. doi:10.1016/j.procs.2011.04.012
10. Simm J., et al. Interpreting Sensor Measurements in Dikes — Experiences from Urbanflood Pilot Sites // *Comprehensive Flood Risk Management: Proc. of the 2nd European Conf. on FLOODrisk Management/Klijn & Schweckendiek* (ed.). 2012. P. 327–336. doi:10.1201/b13715-47
11. Pyayt A. L., et al. Machine Learning Methods for Environmental Monitoring and Flood Protection // *World Academy of Science, Engineering and Technology*. 2011. N 5. P. 118–123.
12. Pyayt A. L., et al. Data-Driven Modelling for Flood Defence Structure Analysis // *Comprehensive Flood Risk Management/Klijn & Schweckendiek* (ed.). 2013. P. 301–306.
13. Pyayt A. L., et al. Combining Data-Driven Methods with Finite Element Analysis for Flood Early Warning Systems // *Intern. Conf. on Computational Science, ICCS 2015 «Computational Science at the Gates of Nature»*. 2015. N 51. P. 2347–2356. doi:10.1016/j.procs.2015.05.404
14. Козионов А. П., Пяйт А. Л., Мохов И. И., Иванов Ю. П. Вейвлет-преобразование и одноклассовая классификация для мониторинга состояния дамб //

- Информационно-управляющие системы. 2014. № 4(71). С. 24–31.
15. Козионов А. П., Пяйт А. Л., Мохов И. И., Иванов Ю. П. Исследование алгоритмов восстановления пропусков в измеряемых сигналах для системы мониторинга состояния дамб // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2015. № 2–3. С. 217–222. doi: 10.5862/JCSTCS.217-222.8
16. Lang B., et al. Neural Clouds for Monitoring of Complex Systems // Optical Memory and Neural Networks. 2008. Vol. 3. N 17. P. 183–192. doi: 10.3103/S1060992X08030016
17. Bishop C. Pattern Recognition and Machine Learning. — N. Y.: Springer, 2006. — 738 p.
18. Box G., Jenkins G. Time Series Analysis: Forecasting and Control. — San Francisco: Holden-Day, 1970. — 573 p.
19. Akaike H. A New Look at the Statistical Model Identification // IEEE Transactions on Automatic Control. 1974. N 19. P. 716–723.
20. Alert Solutions. <http://www.alertsolutions.nl/> (дата обращения: 01.08.2015).

UDC 681.51

doi:10.15217/issn1684-8853.2015.6.10

Algorithm for Dike Abnormal Behavior Detection Based on Transfer Function Model and One-Class ClassificationA. P. Kozionov^{a, b}, R&D Engineer, Post-Graduate Student, alexey.kozionov@gmail.comA. L. Pyayt^a, R&D Leading Engineer, PhD, Computational Science, alexander.pyayt@siemens.comI. I. Mokhov^a, R&D Leading Expert, ilya.mokhov@siemens.comU. P. Ivanov^b, PhD, Tech., Associate Professor, upi@mail.ru^aSiemens, Corporate Technology, 3A, Volynskii St., 191186, Saint-Petersburg, Russian Federation^bSaint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaya St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation

Purpose: Dike monitoring with sensors installed in the dike usually assumes that the sensor readings are compared with some pre-defined threshold values derived from the analysis or modeling of the dike structure. This method can detect only the simplest cases of dike failure like crest overtopping, being useless for more complex cases caused by internal erosion. The purpose of this work is developing and testing an algorithm for detecting an abnormal dike condition caused by internal erosion. **Results:** The proposed algorithm is based on the simulation of the transfer function between the measured signals of the water level and the pore pressure inside the dike. A one-class classifier “Neural Clouds” estimates a nonlinear fuzzy membership function which checks whether the model error belongs to the area of normal state of the dike. The classifier is taught on historical data of normal dike behavior obtained from the sensors. The fuzzy response of the classifier varies from 0 to 1, giving an estimation of how close the current state of the dike is to an abnormal state. The algorithm has been tested on natural experimental data. **Practical relevance:** The results and algorithms were used by Siemens in its AI component of a dike condition monitoring system.

Keywords — Anomaly Detection, Dike Health Monitoring, Intelligent Signal Processing, Transfer Function, Neural Clouds, One-Class Classification.

References

1. *Flood — Data and Statistics*. (2015). Available at: <http://www.preventionweb.net/english/hazards/statistics/?hid=71> (accessed 01 August 2015).
2. Wohl E. *Inland Flood Hazards: Human, Riparian, and Aquatic Communities*. Cambridge, Cambridge University Press, 2000. 518 p.
3. Baars S., Kempen M. *The Causes and Mechanisms of Historical Dike Failures in the Netherlands*. Official Publication of the European Water Association, 2009. 14 p.
4. *FLOODsite project*. (2015). Available at: <http://www.floodsite.net/> (accessed 01 August 2015).
5. *FloodControl 2015*. (2015). Available at: <http://www.floodcontrol2015.com/> (accessed 01 August 2015).
6. *UrbanFlood project*. (2015). Available at: <http://www.urbanflood.eu> (accessed 01 August 2015).
7. *IJKDijk project*. Available at: <http://www.floodcontrolijkdijk.nl/> (accessed 01 August 2015).
8. Isermann R. *Fault-Diagnosis Systems: an Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance*. Berlin, Berlin Springer, 2006. 475 p.
9. Krzhizhanovskaya V. V., Shirshov G. S., Melnikova N. B., Belleman R. G., Rusadi F. I., Broekhuijsen B. J., Gouldby B. P., Lhomme J., Balis B., Bubak M., Pyayt A. L., Mokhov I. I., Ozhigin A. V., Lang B., Meijer R. J. Flood Early Warning System: Design, Implementation and Computational Models. *Procedia Computer Science*, 2011, vol. 4, pp. 106–115. doi:10.1016/j.procs.2011.04.012
10. Simm J., Jordan D., Topple A., Mokhov I., Pyayt A., Abdoun T., Bennett V., Broekhuijsen J., Meijer R. Interpreting Sensor Measurements in Dikes — Experiences from Urban-flood Pilot Sites. *Proc. of the 2nd European Conf. on FLOOD Risk Management “Comprehensive Flood Risk Management”*, Klijn & Schweckendiek (ed.), 2012, pp. 327–336. doi:10.1201/b13715-47
11. Pyayt A. L., Mokhov I. I., Lang B., Krzhizhanovskaya V. V., Meijer R. J. Machine Learning Methods for Environmental Monitoring and Flood Protection. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 2011, vol. 5, pp. 118–123.
12. Pyayt A. L., Mokhov I. I., Kozionov A. P., Kuserbaeva V. T., Lang B., Krzhizhanovskaya V. V., Meijer R. J. Data-Driven Modelling for Flood Defence Structure Analysis. *Comprehensive Flood Risk Management*, Klijn & Schweckendiek (ed.), 2013, pp. 301–306.
13. Pyayt A. L., Shevchenko D. V., Kozionov A. P., Mokhov I. I., Lang B., Krzhizhanovskaya V. V., Sloot P. M. A. Combining Data-Driven Methods with Finite Element Analysis for Flood Early Warning Systems. *Intern. Conf. on Computational Science, ICCS 2015 “Computational Science at the Gates of Nature”*, 2015, no. 51, pp. 2347–2356. doi:10.1016/j.procs.2015.05.404

14. Kozionov A. P., Pyayt A. L., Mokhov I. I., Ivanov Y. P. Wavelet Transform and One-Class Classification for Dike Health Monitoring. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2014, no. 4(71), pp. 24–31 (In Russian).
15. Kozionov A. P., Pyayt A. L., Mokhov I. I., Ivanov Y. P. Research on Gap-Filling Algorithms For Dike Health Monitoring Systems. *Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii. Upravlenie*, 2015, no. 2–3, pp. 217–222 (In Russian). doi:10.5862/JCSTCS/8
16. Lang B., Poppe T., Minin A., Mokhov I., Kuperin Y., Mекler A., Liapakina I. Neural Clouds for Monitoring of Complex Systems. *Optical Memory and Neural Networks*, 2008, vol. 3, no. 17, pp. 183–192. doi:10.3103/S1060992X08030016
17. Bishop C. *Pattern Recognition and Machine Learning*. New York, Springer, 2006. 738 p.
18. Box G., Jenkins G. *Time Series Analysis: Forecasting and Control*. San Francisco, Holden-Day, 1970. 573 p.
19. Akaike H. A New Look at the Statistical Model Identification. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1974, no. 19(6), pp. 716–723. doi:10.1109/TAC.1974.1100705
20. *Alert Solutions*. (2015). Available at: <http://www.alertsolutions.nl/> (accessed 01 August 2015).

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 завертываются 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

УДК 658.512.6

doi:10.15217/issn1684-8853.2015.6.19

АНАЛИЗ СОБЫТИЙ АДАПТИВНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ГРУЗОПОТОКА РОССИЙСКОГО СЕГМЕНТА МЕЖДУНАРОДНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

О. И. Лахин^{а, 1}, руководитель направления

^аООО «Научно-производственная компания «Разумные решения», Самара, РФ

Постановка проблемы: одной из главных задач обеспечения работы Международной космической станции является управление грузопотоком. Для планирования грузопотока требуется учитывать множество различных по своей природе факторов, критериев, правил, предпочтений и ограничений. Любое важное событие ведет к цепочке перепланирования многих других связанных действий. Целью работы является проведение исследования и анализа для классификации основных событий, возникновение которых приводит к согласованному изменению поблочного грузопотока. **Методы:** адаптивное перепланирование поблочного грузопотока российского сегмента Международной космической станции, которое иницируется событиями, с применением мультиагентных технологий и онтологий, где принимается во внимание динамический баланс интересов всех сторон с учетом основных ограничений и предпочтений участников процесса адаптивного планирования грузопотока в ответ на поступающие события в режиме реального времени. **Результаты:** выявлено, что возникновение любых важных событий приводит к перепланированию размещения грузов на транспортных грузовых кораблях «Прогресс» и транспортных пилотируемых кораблях «Союз». Представлены сценарии обработки приведенных событий планировщиком поблочного грузопотока российского сегмента Международной космической станции. **Практическая значимость:** обработка приведенных событий реализована в интерактивной мультиагентной системе построения программы полета, грузопотока и расчета ресурсов российского сегмента Международной космической станции. Внедрение системы позволило повысить эффективность процесса планирования и снизить риски по управлению и обслуживанию российского сегмента Международной космической станции.

Ключевые слова — российский сегмент Международной космической станции, программа полета, поблочный грузопоток, события и сценарии, адаптивное планирование, мультиагентные технологии.

Введение

Международная космическая станция (МКС) — один из сложнейших проектов за всю историю человечества, в реализации которого участвуют большие коллективы ученых и инженеров из России, США и других стран [1]. Одна из главных задач жизнеобеспечения работы МКС — управление грузопотоком по доставке на станцию важнейших грузов, таких как топливо и вода, воздух и продукты питания, запасные части, инструменты и принадлежности, научная аппаратура для проведения космических экспериментов, а также возврат грузов и результатов экспериментов на Землю.

Для планирования грузопотока требуется учитывать множество разных по своей природе факторов, критериев принятия решений, ограничений и предпочтений, включая состояние склада и ресурсы приборов на станции, изменяющиеся потребности в топливе, воде, воздухе и продовольствии, особенности баллистики в движении станции, солнечную активность, типы кораблей и стыковочных модулей и др. [2, 3].

При этом любое важное событие, например изменение дат запусков, стыковок или отстыковок

кораблей, потеря грузового корабля, изменение состава экипажа или внеплановые работы на борту станции, ведет к цепочке перепланирования многих других связанных с ним работ, ресурсы для которых должны быть пересчитаны.

В частности, появление космического мусора на орбите (например, из-за внезапного отказа запущенного спутника) вызовет необходимость маневра станции и корректировки ее орбиты. Для этого потребуются включение двигателей, что является причиной дополнительных затрат топлива и, соответственно, необходимости в следующем старте транспортного грузового корабля (ТГК) доставить на станцию больше топлива, перепланировав некоторые грузы на дальнейшие полеты, и т. д.

Грузоподъемность ТГК и транспортных пилотируемых кораблей (ТПК) ограничена, поэтому если неожиданно возникает потребность в дополнительном грузе, то объемы и массы других грузов приходится уменьшать, согласованно меняя планы отправки грузов на последующих кораблях.

В работе проводятся исследование, анализ и классификация возможных событий, приводящих к согласованной перестройке всех планов по доставке грузов, а также рассматриваются сценарии планирования, которые адаптивно изменяют план грузопотока российского сегмента Международной космической станции (РС МКС).

¹ Научный руководитель — профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой электронных систем и информационной безопасности Самарского государственного технического университета П. О. Скобелев.

Особенности грузопотока и события, приводящие к перепланированию

Сложность планирования поблочного грузопотока вызвана следующими правилами и ограничениями:

- грузоподъемность ТГК «Прогресс» составляет 2500 кг;
- планируемые к доставке грузы делятся на четыре категории: сухой груз, вода, топливо, газ;
- для каждой из категорий грузов предусмотрен ограничивающий диапазон с минимальным

и максимальным значениями возможной к доставке массы (табл. 1);

— определение даты возможной доставки грузов на станцию.

Грузы, входящие в категорию «Сухой груз», имеют приоритет размещения, который варьируется от 1 (самый важный) до 8 (минимальный приоритет). При этом грузы с большим приоритетом могут вытеснять грузы с меньшим приоритетом.

В случае нехватки свободного места на ТГК «Прогресс» грузы разных категорий могут вытеснять друг друга в следующей последовательности:

— если масса всех сухих грузов превысила максимальный допустимый предел 1600 кг, то сухие грузы вытесняют друг друга с учетом приоритета;

— если масса всех сухих грузов составила 1600 кг, но на ТГК «Прогресс» не хватает свободного места для жидкостей, то последовательно вытесняются вода, топливо, газ, при этом каждый груз вытесняется до своего минимума, т. е., например, воды в любом случае будет запланировано на полет минимум 100 кг.

■ **Таблица 1.** Характеристики категорий груза

Категория груза	Минимальная масса доставляемого груза, кг	Максимальная допустимая масса доставляемого груза, кг
Сухой груз	100	1600
Вода	100	420
Топливо	100	1100
Газ	20	50

■ **Таблица 2.** События адаптивного планирования грузопотока РС МКС

№	Событие	Причина возникновения события
1	Добавление груза в поблочный грузопоток	Срочный заказ от куратора на доставку на РС МКС не предусмотренного ранее груза, например, в связи с поломкой оборудования
2	Удаление груза из грузопотока	Отмена заказа на доставку запланированного груза, например, если не успели вовремя подготовить груз
3	Изменение количества груза	
3.1	Увеличение количества сухого груза	Запрос на доставку дополнительного количества сухого груза
3.2	Уменьшение количества сухого груза	Запрос на уменьшение количества запланированного на доставку сухого груза
3.3	Увеличение количества жидкости	Запрос на доставку дополнительного количества жидкости
3.4	Уменьшение количества жидкости	Запрос на уменьшение количества запланированной на доставку жидкости
4	Изменение массы груза на полете	Запрос на уменьшение массы груза, запланированного на доставку
5	Изменение приоритета груза на полете	Срочная заявка на изменение приоритета груза, предназначенного для парирования нештатной ситуации при ее возникновении
6	Изменение предпочитаемого типа корабля в онтологии грузопотока	Изменение типа корабля для доставки груза
7	Изменение предпочитаемого диапазона дат для планирования груза	Изменение даты доставки груза, например с запасными частями, инструментами и принадлежностями, на более ранний срок при выходе из строя оборудования
8	Фиксирование груза на полете	Заявка на фиксацию груза на конкретном транспортном корабле при необходимости доставить его в любом случае
9	Доукомплектация полета сухими грузами	Необходимость доукомплектации транспортного корабля дополнительными сухими грузами
10	Разукомплектация полета	Отмена полета транспортного корабля
11	Изменение программы полета	
11.1	Удаление полета	Изменение программы полета при удалении из нее полета транспортного корабля
11.2	Добавление полета	Изменение программы полета при добавлении нового полета транспортного корабля

Было проведено исследование всех возможных событий, приводящих к перепланированию грузопотока, в ходе анализа была произведена их классификация (табл. 2).

Вышеперечисленные события приводят к адаптивному изменению грузопотока РС МКС на основе сценариев, приведенных в следующем разделе.

Основные сценарии планирования поблочного грузопотока

Для описания сценариев планирования поблочного грузопотока в качестве исходных данных выступают ранее сформированные программа полета и поблочный грузопоток РС МКС. Приведенные ниже сценарии работы планировщика поблочного грузопотока разработаны с применением мультиагентного подхода [4–7] и предметных онтологий [8–10] только для одного ТГК.

Добавление груза в поблочный грузопоток

Предположим, что для поддержания жизнедеятельности станции необходимо срочно доставить некоторое оборудование в связи с его поломкой. Поскольку доставка груза имеет приоритетное значение, в результате планирования грузопотока грузы с меньшим приоритетом будут вытеснены с текущего полета на более позднее время.

Данный сценарий показывает пример добавления груза «Вентилятор» с большим приоритетом и вытеснение уже запланированных грузов, имеющих меньший приоритет.

Шаг 1. Создать копию поблочного грузопотока для дальнейшего формирования извещения.

Шаг 2. Добавить новый груз в поблочный грузопоток: выбрать наименование нужного груза, например «Вентилятор» (децимальный номер 17КС.53Ю 5011-0, приоритет груза 2), и ввести требуемое количество на соответствующий полет, например, 7 ед. на ТГК «Прогресс 410».

Шаг 3. В поблочном грузопотоке должна появиться строка, соответствующая новому грузу, подсвеченная розовым цветом, это означает, что у массы данного груза значение «предложено» больше, чем «запланировано». Далее начинает работать подсистема автоматического планирования (планировщик). После обновления сведений от планировщика строка, соответствующая грузу «Вентилятор», окрашивается в белый цвет, т. е. для массы данного груза значение «предложено» равно значению «запланировано».

Шаг 4. Поскольку добавленный груз имеет высокий приоритет (2) и общая загрузка ТГК «Прогресс» не увеличилась и составила 2500 кг, в результате перепланирования поблочного грузопотока часть менее приоритетного груза была вытеснена на другие полеты. Чтобы просмотреть список вытесненных грузов, необходимо сформировать извещение.

Шаг 5. Согласно извещению, были перепланированы следующие грузы (табл. 3).

В результате перепланирования состав грузов может измениться и на других транспортных грузовых кораблях, запланированных в программе полета.

■ Таблица 3. Перечень грузов, перепланированных в ходе добавления нового груза

№	Наименование груза	Децимальный номер и приоритет груза	Количество груза		Причина перепланирования
			до перепланирования	после перепланирования	
1	Преобразователь тока аккумуляторной батареи ПТАБ-1М	ЕИГА.435241.001-03, приоритет 3	6	5	При вытеснении груза учитываются его приоритет и масса. Вытеснение груза произошло, поскольку приоритет ПТАБ-1М ниже (3), чем у добавленного груза. Также у вытесненного груза высокая масса (14 кг)
2	Микроэлектронный интегратор разрядно-зарядных токов МИРТ-3	СЛИЮ.411613.001, приоритет 3	0	1	Переброс на ранний полет произошел, так как в результате переброса груза «ПТАБ-1М» (см. № 1) освободилось 14 кг массы. Общая масса добавленного вентилятора составила 6,3 кг. Итого, осталось свободного места на 14 – 6,3 = 7,7 кг. Чтобы заполнить данное свободное место, с более поздних полетов будут переброшены легкие грузы с учетом их приоритета
3	Регулятор тока РТ-50-1М	ЕИГА.435264.001-03, приоритет 3	1	2	
4	Элемент питания, тип AA Alkaline	AA Alkaline, приоритет 7	16	15	
5	Жесткий диск HDD	SM-FOTO-HDD, приоритет 7	0	1	

Удаление груза из грузопотока

Предположим, что отпала необходимость в доставке на РС МКС некоторого оборудования. Поскольку в результате удаления груза на полете освободится место, на свободное место будет запланирован груз с позднего полета.

Данный сценарий показывает пример удаления груза «Вентилятор» и вытеснение уже запланированных грузов, имеющих меньший приоритет.

Шаг 1. Создать копию поблочного грузопотока для дальнейшего формирования извещения.

Шаг 2. Для того чтобы удалить груз «Вентилятор» (децимальный номер 6411-01, количество 4 шт., полет ТГК «Прогресс 410») из поблочного грузопотока, необходимо выделить строку с данным грузом и удалить его из соответствующего раздела «Служебный модуль», «Средства жизнеобеспечения», «Средства обеспечения газового состава», «Средства очистки атмосферы». После подтверждения удаления строка с грузом «Вентилятор» должна исчезнуть, а масса сухих грузов должна остаться прежней — 1600 кг.

Шаг 3. Поскольку на полете освободится место, другие сухие грузы займут это место. Согласно извещению, были перепланированы следующие грузы (табл. 4).

Изменение количества груза

Предположим, что возникла необходимость увеличить количество доставляемых на ТГК «Прогресс» грузов. Поскольку в результате уве-

личения количества доставляемых грузов возникает нехватка свободного места, грузы могут вытеснять друг друга с учетом приоритета.

Для демонстрации сценариев изменения количества груза опишем случай увеличения количества сухого груза.

Шаг 1. Создать копию поблочного грузопотока для дальнейшего формирования извещения.

Шаг 2. Для редактирования значения груза выделить строку с нужным грузом, например «Вентилятор» (децимальный номер 6411-01, приоритет 1), и изменить предлагаемое значение на полете ТГК «Прогресс 410» с 4 шт. на 5 шт.

Шаг 3. После появления сообщения от планировщика и обновления грузопотока количество груза «Вентилятор» в поблочном грузопотоке должно увеличиться с 4 до 5.

Шаг 4. Поскольку добавленный груз имеет высокий приоритет (1) и общая загрузка ТГК «Прогресс» не увеличилась и составила 2500 кг, то в результате перепланирования поблочного грузопотока часть менее приоритетного груза была вытеснена на другие полеты. Чтобы просмотреть список вытесненных грузов, необходимо сформировать извещение.

Согласно извещению, были перепланированы следующие грузы (табл. 5).

Изменение массы груза на полете

Для каждого груза в онтологии поблочного грузопотока указывается «нормативная» мас-

■ Таблица 4. Перечень грузов, перепланированных в ходе удаления нового груза

№	Наименование груза	Децимальный номер, приоритет и масса груза	Количество груза		Причина перепланирования
			до перепланирования	после перепланирования	
1	Вентилятор	6411-01, приоритет 1, масса 2,3 кг	4	0	При вытеснении груза учитываются его приоритет и масса. В результате удаления освободилось $2,3 \times 4 = 9,2$ кг. В результате перепланирования были запланированы грузы общей массой $+1 \times 1,7 + 1 \times 14 - 10 \times 0,63 - 9 \times 0,03 + 1 \times 0,1 = 9,2$ кг
2	М-приемник со шлангом	A8-9060-800-04, приоритет 1, масса 1,7 кг	0	1	
3	Преобразователь тока аккумуляторной батареи ПТАВ-1М	ЕИГА.435241.001-03, приоритет 3, масса 14 кг	6	7	
4	Микроэлектронный интегратор разрядно-зарядных токов МИРТ-3	СЛИЮ.411613.001, приоритет 3, масса 0,63 кг	11	1	
5	Элемент питания, тип AA Alkaline	AA Alkaline приоритет 7, масса 0,03 кг	16	7	
6	Футляр для жесткого диска	SM-FOTO-BOXHDD, приоритет 7, масса 0,1 кг	0	1	

■ **Таблица 5.** Перечень грузов, перепланированных из-за увеличения количества сухого груза

№	Наименование груза	Децимальный номер, приоритет и масса груза	Количество груза		Причина перепланирования
			до перепланирования	после перепланирования	
1	Вентилятор	6411-01, приоритет 1, масса 2,3 кг	4	5	Груз имеет наибольший приоритет, вследствие увеличения количества груза на 1 ед. требуется 2,3 кг дополнительной массы, следовательно, грузы с низшим приоритетом будут вытеснены с полета. В результате перепланирования получим $+1 \times 2,3 + 1 \times 11 - 1 \times 14 + 1 \times 0,63 + 1 \times 0,7 = 0,63$ кг
2	Твердотопливный генератор кислорода ТГК	17КС.216Ю 0000А-0, приоритет 1, масса 11 кг	0	1	
3	Преобразователь тока аккумуляторной батареи ПТАБ-1М	ЕИГА.435241.001-03, приоритет 3, масса 14 кг	6	5	
4	Микроэлектронный интегратор разрядно-зарядных токов МИРТ-3	СЛИЮ.411613.001, приоритет 3, масса 0,63 кг	11	12	
5	Футляр для жесткого диска	SM-ФОТО-ВОХНDD, приоритет 7, масса 0,1 кг	0	1	

■ **Таблица 6.** Перечень грузов, перепланированных из-за уменьшения фактической массы сухого груза

№	Наименование груза	Децимальный номер, приоритет и масса груза	Количество груза		Причина перепланирования
			до перепланирования	после перепланирования	
1	Блок управления преобразователем тока аккумуляторной батареи БУПТ-1М	ЕИГА.468333.001-03, приоритет 4, масса 3,7 кг	0	2	Из-за уменьшения фактической массы освободилось 2 кг массы ($14 - 12 = 2$ кг), в результате дополнительно запланировалась 1 ед. ПТАБ-1М и вытеснились грузы с меньшим приоритетом
2	Преобразователь тока аккумуляторной батареи ПТАБ-1М	ЕИГА.435241.001-03, приоритет 2, масса 12 кг	6	7	
3	Микроэлектронный интегратор разрядно-зарядных токов МИРТ-3	СЛИЮ.411613.001, приоритет 3, масса 0,63 кг	11	0	
4	Элемент питания, тип АА Alkaline	АА Alkaline, приоритет 7, масса 0,03 кг	16	0	

са, которая примерно одинакова для всех грузов данного типа. Однако фактическая масса конкретного экземпляра груза, отправляемого на ТГК «Прогресс», может отличаться в большую или меньшую сторону.

Шаг 1. Создать копию поблочного грузопотока для дальнейшего формирования извещения.

Шаг 2. Указать необходимое значение фактической массы. При этом во всех других полетах масса данного груза не изменится и будет равна нормативной.

Например, уменьшим массу груза «Преобразователь тока аккумуляторной батареи ПТАБ-

1М» (децимальный номер ЕИГА.435241.001-03, масса 14 кг, приоритет 3) с 14 до 12 кг на полете ТГК «Прогресс 410».

Шаг 3. После изменения в поблочном грузопотоке будет отражено новое значение массы и произойдет перепланирование грузопотока. Согласно извещению, были перепланированы следующие грузы (табл. 6).

Изменение приоритета груза на полете

Для каждого груза в онтологии поблочного грузопотока указывается «нормативный» приоритет, который зависит от типа груза (пища,

обеспечение экипажа, научная аппаратура, коммерческие грузы и пр.). Приоритет груза указывается в онтологии поблочного грузопотока, однако для конкретного полета приоритет груза может отличаться, например, важно запланировать на конкретный полет какую-то научную аппаратуру. Для этого необходимо увеличить приоритет груза только на данном полете.

Шаг 1. Создать копию поблочного грузопотока для дальнейшего формирования извещения.

Шаг 2. Указать необходимое значение приоритета. При этом во всех других полетах приоритет данного груза не изменится и будет равен нормативному.

Например, увеличим приоритет груза «Вентилятор» (децимальный номер МО-2-5008) с 4 до 1 на полете ТГК «Прогресс 410».

Шаг 3. После изменения приоритета произойдет перепланирование грузопотока. Согласно извещению, были перепланированы следующие грузы (табл. 7).

■ Таблица 7. Перечень грузов, перепланированных из-за изменения приоритета конкретного груза

№	Наименование груза	Децимальный номер, приоритет и масса груза	Количество груза		Причина перепланирования
			до перепланирования	после перепланирования	
1	Вентилятор	МО-2-5008, приоритет 1, масса 2,5 кг	0	11	В результате изменения приоритета с 4 на 1 был запланирован груз «Вентилятор». Также был запланирован груз «Набор личной гигиены «Комфорт-3М» с приоритетом 1. Остальные грузы с низким приоритетом были вытеснены: $+11 \times 2,5 + 1 \times 2,5 - 2 \times 14 - 1 \times 0,63 - 16 \times 0,03 = 0,89$ кг
2	Набор личной гигиены «Комфорт-3М»	Хт2.945.606, приоритет 1, масса 2,5 кг	0	1	
3	Преобразователь тока аккумуляторной батареи ПТАВ-1М	ЕИГА.435241.001-03, приоритет 2, масса 14 кг	6	4	
4	Микроэлектронный интегратор разрядно-зарядных токов МИРТ-3	СЛИЮ.411613.001, приоритет 3, масса 0,63 кг	11	10	
5	Элемент питания, тип AA Alkaline	AA Alkaline, приоритет 7, масса 0,03 кг	16	0	

■ Таблица 8. Перечень грузов, перепланированных из-за изменения типа предпочитаемого корабля

№	Наименование груза	Децимальный номер, приоритет и масса груза	Количество груза		Причина перепланирования
			до перепланирования	после перепланирования	
1	Набор личной гигиены «Комфорт-1М»	Хт2.945.605, приоритет 1, масса 2,5 кг	0	1	В результате размещения груза «Набор личной гигиены «Комфорт-1М»» часть грузов с ТГК «Прогресс 410» была вытеснена
2	Блок управления преобразователем тока аккумуляторной батареи БУПТ-1М	ЕИГА.468333.001-03, приоритет 4, масса 3,7 кг	0	5	
3	Преобразователь тока аккумуляторной батареи ПТАВ-1М	ЕИГА.435241.001-03, приоритет 2, масса 12 кг	6	5	
4	Микроэлектронный интегратор разрядно-зарядных токов МИРТ-3	СЛИЮ.411613.001, приоритет 3, масса 0,63 кг	11	0	

Изменение предпочитаемого типа корабля в онтологии грузопотока

Для каждого груза в онтологии поблочного грузопотока может быть указан предпочитаемый тип корабля, на котором груз доставляется на РС МКС. Груз может быть доставлен кораблями ТГК «Прогресс» или ТПК «Союз».

Рассмотрим изменение предпочитаемого типа корабля для груза «Набор личной гигиены “Комфорт-1М”» (децимальный номер Хт2.945.605).

Шаг 1. Пусть в исходном поблочном грузопотоке предложена и запланирована одна единица груза «Набор личной гигиены “Комфорт-1М”».

Шаг 2. В онтологии грузопотока указан в качестве предпочитаемого типа транспортный корабль ТПК «Союз-ТМА».

Шаг 3. Изменить тип предпочитаемого транспортного корабля на ТГК «Прогресс-М».

Шаг 4. После перепланирования груз был «переброшен» с ТПК «Союз 702» на ТГК «Прогресс 410». Подробные сведения о перепланированных грузах можно просмотреть в извещении (фрагмент представлен в табл. 8).

Изменение предпочитаемого диапазона дат для планирования груза

Для каждого груза можно указать предпочитаемый диапазон дат доставки на РС МКС.

Данный сценарий продемонстрируем на примере груза «Преобразователь тока аккумуляторной батареи ПТАБ-1М» (децимальный номер ЕИГА.435241.001-03).

Шаг 1. При просмотре исходного запланированного грузопотока видно, что часть груза «Преобразователь тока аккумуляторной батареи ПТАБ-1М» «переброшена» с ТГК «Прогресс 410» на ТГК «Прогресс 411» (2 ед. из 8). В качестве временного диапазона для груза указан период с 01.01.2011 по 30.06.2011.

Шаг 2. Ограничим диапазон до стыковки ТГК «Прогресс 411». Как видно из программы полета, дата стыковки ТГК «Прогресс 411» 20.06.2011. В поблочном грузопотоке изменим в диапазоне дат 30.06.2011 на 20.06.2011.

Шаг 3. После перепланирования груз «Преобразователь тока аккумуляторной батареи ПТАБ-1М» не запланировался на ТГК «Прогресс 411», поскольку диапазон предпочитаемых дат груза не совпадает с периодом полета ТГК «Прогресс 411».

Фиксирование груза на полете

Необходимо реализовать возможность «принудительного» планирования груза на конкретный полет: предположим, что груз, несмотря на свой низкий приоритет, обязательно должен лететь на конкретном транспортном корабле.

Данный сценарий является продолжением предыдущего сценария: в результате изменения предпочитаемого диапазона дат на полет ТГК «Прогресс 410» была запланирована только часть груза (5 ед. из 8 ед. требуемых). Допустим, что есть необходимость обязательно отправить на ТГК «Прогресс 410» все 8 ед. груза «Преобразователь тока аккумуляторной батареи ПТАБ-1М». Для этого необходимо:

Шаг 1. В поблочном грузопотоке вручную ввести запланированное значение 8 для груза «Преобразователь тока аккумуляторной батареи ПТАБ-1М» и зафиксировать планируемое значение.

Шаг 2. После перепланирования все 8 ед. груза запланированы на полете ТГК «Прогресс 410».

Шаг 3. В результате перепланирования часть грузов была вытеснена на более поздние полеты.

Доукомплектация полета сухими грузами

Необходимо реализовать возможность доукомплектации полета сухими грузами. Доукомплектация означает, что если на транспортном корабле имеется свободное место, т. е. сухих грузов запланировано меньше 1600 кг, то на данное свободное место могут быть запланированы сухие грузы с соседних полетов.

Шаг 1. При просмотре загрузки полетов сухими грузами согласно карте полетов видно, что ТГК «Прогресс 412» заполнен не полностью. Согласно логике планирования, на данном полете можно разместить еще $1600 - 1194,6 = 405,4$ кг сухого груза.

Шаг 2. Вызвав команду «Доукомплектовать полет», доукомплектуем полет ТГК «Прогресс 412».

Шаг 3. После перепланирования на полет ТГК «Прогресс 412» запланировано 1600 кг сухого груза.

Разукомплектация полета

Параллельно с доукомплектацией необходимо реализовать возможность «разукомплектовать» полет.

Шаг 1. При просмотре загрузки полетов сухими грузами согласно карте полетов видно, что ТГК «Прогресс 412» заполнен полностью.

Шаг 2. Разукомплектуем полет ТГК «Прогресс 412», вызвав команду «Разукомплектовать полет».

Шаг 3. После перепланирования масса запланированного сухого груза в результате разукомплектации уменьшилась с 1600 до 1194,6 кг.

Изменение программы полета

Поблочный грузопоток тесто связан с данными из программы полета. В частности, речь идет

о количестве полетов, а также о датах стыковки/расстыковки.

Ниже представлено описание сценария, показывающего взаимосвязь между программой полета и поблочным грузопотоком при удалении полета.

Шаг 1. Загрузить требуемую программу полета.

Шаг 2. Удалить полет ТГК «Прогресс 412» из программы полета.

Шаг 3. В поблочном грузопотоке полет ТГК «Прогресс 412» стал подсвечиваться серым цветом, обозначаящим, что полет удален из программы полета.

Шаг 4. В результате удаления полета из программы полета грузы, запланированные на данный полет, оказались в «подвешенном» состоянии. Их необходимо перенести на другой полет, выбрав команду «Перенести грузы», указать номер полета, куда переносится груз, при этом грузы перебрасываются с ТГК «Прогресс 412» на ТГК «Прогресс 414» с соблюдением всех правил и ограничений.

Заключение

В работе описаны особенности планирования грузопотока РС МКС и проведено исследование основных событий, влияющих на изменение поблочного грузопотока РС МКС. В результате анализа основные события были классифицированы по типам.

Для возникающих событий различных типов были разработаны сценарии перепланирования поблочного грузопотока, рассмотрены шаги планирования с учетом правил и ограничений, описанных в онтологии грузопотока.

Сценарии работы планировщика поблочного грузопотока разработаны с применением мультиагентного подхода и предметных онтологий, что обеспечило нахождение динамического баланса интересов кораблей, модулей и систем РС МКС, полетов, грузов с учетом основных ограничений и предпочтений участников процесса адаптивного планирования ресурсов в ответ на поступающие события в режиме реального времени.

Литература

1. Соловьев В. А., Лысенко Л. Н., Любинский В. Е. Управление космическими полетами. — М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009. Ч. I. — 476 с.
2. Лахин О. И. Особенности постановки задачи планирования программы полета и грузопотока Российского сегмента Международной космической станции // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. 2015. № 3(47). С. 32–46.
3. Лахин О. И., Майоров И. В. Метод адаптивного планирования грузопотока РС МКС на основе мультиагентных технологий // Мехатроника, автоматизация, управление. 2015. Т. 16. № 12. С. 847–852.
4. Скобелев П. О. Мультиагентные технологии в промышленных применениях: к 20-летию основания Самарской научной школы мультиагентных систем // Мехатроника, автоматизация, управление. 2010. № 12. С. 33–46.
5. Скобелев П. О. Интеллектуальные системы управления ресурсами в реальном времени: принципы разработки, опыт промышленных внедрений и перспективы развития // Приложение к теоретическому и прикладному научно-техническому журналу «Информационные технологии». 2013. № 1. С. 1–32.
6. Vittikh V. A., Larukhin V. B., Tsarev A. V. Actors, Holonic Enterprises, Ontologies and Multi-Agent Technology // Proc. of 6th Intern. Conf. on Industrial Applications of Holonic and Multi-Agent Systems (HoloMAS'2013), Aug. 26–28, 2013, Prague, Czech Republic. Springer, 2013. P. 13–24.
7. Skobelev P. O. Multi-Agent Systems for Real Time Adaptive Resource Management // Industrial Agents: Emerging Applications of Software Agents in Industry/Paulo Leitão, Stamatis Karnouskos (Ed.). — Elsevier, 2015. P. 207–230.
8. Матюшин М. М. и др. Методы и средства построения онтологий для визуализации связанных информационных объектов произвольной природы в сложных информационно-аналитических системах / М. М. Матюшин, Т. Г. Вакурина, В. В. Котеля, П. О. Скобелев, О. И. Лахин, С. С. Кожевников, Е. В. Симонова, А. И. Носкова // Информационно-управляющие системы. 2014. № 2(69). С. 9–17.
9. Вакурина Т. Г. и др. Онтология Российского сегмента Международной космической станции и ее практическое использование в интеллектуальных аэрокосмических приложениях/ Т. Г. Вакурина, В. В. Котеля, О. И. Лахин, М. М. Матюшин, П. О. Скобелев // Материалы IV Междунар. науч.-техн. конф. «Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем», Минск, 20–22 февраля 2014 г. Минск: БГУИР, 2014. С. 221–226.
10. Вакурина Т. Г. и др. Корпоративная распределенная онтология для управления Российским сегментом Международной космической станции / Т. Г. Вакурина, О. И. Лахин, Ю. С. Юрыгина, Е. В. Симонова, Д. Н. Коршиков, А. И. Носкова // Тр. XVI Междунар. конф. «Проблемы управления и моделирования в сложных системах», Самара, 30 июня–03 июля 2014 г. Самара: СИЦ РАН, 2014. С. 435–443.

UDC 658.512.6

doi:10.15217/issn1684-8853.2015.6.19

Analysis of Cargo Flow Adaptive Scheduling Events for the Russian Segment of the International Space Station

Lakhin O. I.^a, Project Manager, lakhin@yandex.ru^aSoftware Engineering Company «Smart Solutions», 17, Moscovskoe St., 443013, Samara, Russian Federation

Purpose: Cargo flow management is crucial for the functioning of the International Space Station. Cargo flow scheduling must take into account a lot of different factors, criteria, rules, preferences and constraints. Any important event can lead to a chain of rescheduling. The aim of this work is research and analysis in order to classify the main events which can lead to changes in an agreed cargo flow schedule. **Methods:** The cargo flow for the International Space Station (Russian segment) is an object of adaptive rescheduling which is triggered by events, using multi-agent technologies and ontologies. The paper shows how to achieve a dynamic balance between the interests of all the sides, taking into account the major constraints and preferences of adaptive resource scheduling process participants in response to incoming events in real time. **Results:** The paper shows that any important events lead to rescheduling of cargo allocation between the transportation flights. The main scenarios have been developed for processing such types of events by the ISS cargo flow scheduler. **Practical relevance:** The results of this work are used in an interactive multi-agent system for developing the flight program, scheduling the cargo flow and estimating the resources of the Russian segment of ISS. The introduction of the system has increased the scheduling process efficiency and reduced the risks in management and servicing of the Station.

Keywords — International Space Station (Russian Segment), Flight Program, Cargo Flow, Events and Scenarios, Adaptive Scheduling, Multi-Agent Technologies.

References

1. Solov'jov V. A., Lysenko L. N., Ljubinskij V. E. *Upravlenie kosmicheskimi poletami* [Spaceflight Control]. Moscow, MGTU Publ., 2009. Part 1. 476 p. (In Russian).
2. Lakhin O. I. Specific Features of Problem Statement for Flight Program and Cargo Flow Scheduling for the Russian Segment of the International Space Station. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser. Tekhnicheskie nauki*, 2015, no. 3(47), pp. 32–46 (In Russian).
3. Lakhin O. I., Mayorov I. V. Method of Adaptive Cargo Flow Scheduling for the ISS RS on the Basis of Multi-Agent Technology. *Mekhatronika, avtomatizatsiia, upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 12, pp. 847–852 (In Russian).
4. Skobelev P. O. Multi-Agent Technology for Industrial Applications: Towards 20 years Anniversary of Samara Scientific School of Multi-Agent Systems. *Mekhatronika, avtomatizatsiia, upravlenie*, 2011, no. 12, pp. 33–46 (In Russian).
5. Skobelev P. O. Intelligent Systems for Real Time Resource Management: Principles, Experience and Perspectives. *Appendix to Theoretic and Applied Scientific and Technical Journal "Informatsionnye tekhnologii"*, 2013, no. 1, pp. 1–32 (In Russian).
6. Vittikh V. A., Larukhin V. B., Tsarev A. V. Actors, Holonic Enterprises, Ontologies and Multi-Agent Technology. *Proc. of 6th Intern. Conf. on Industrial Applications of Holonic and Multi-Agent Systems (HoloMAS'2013)*. Prague, Springer, 2013, pp. 13–24.
7. Skobelev P. O. Multi-Agent Systems for Real Time Adaptive Resource Management. In: *Industrial Agents. Emerging Applications of Software Agents in Industry* / Paulo Leitão, Stamatis Karnouskos (Ed.). Elsevier, 2015, pp. 207–230.
8. Matyushin M. M., Vakurina T. G., Kotelya V. V., Skobelev P. O., Lakhin O. I., Kozhevnikov S. S., Simonova E. V., Noskova A. I. Methods and Software for Creation of Ontologies for Visualizing Connected Information Objects of Random Nature in Complex Information-Analytical Systems. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2014, no. 2(69), pp. 9–17 (In Russian).
9. Vakurina T. G., Kotelya V. V., Lakhin O. I., Matushin M. M., Skobelev P. O. Ontology of ISS Russian Segment and its Practical Use in Intellectual Aerospace Applications. *Materialy IV Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Otkrytye semanticheskie tekhnologii proektirovaniia intellektual'nykh sistem"* [Proc. of the IV Intern. Scientific and Technical Conf. "Open Semantic Technologies for Intelligent Systems" (OSTIS-2014)]. Minsk, 2014, pp. 221–226 (In Russian).
10. Vakurina T. G., Lakhin O. I., Jurygina Ju. S., Simonova E. V., Korshikov D. N., Noskova A. I. Corporate Distributed Ontology for Management of the Russian Segment of the International Space Station. *Trudy XVI Mezhdunarodnoi konferentsii "Problemy upravleniia i modelirovaniia v slozhnykh sistemakh"* [Proc. of XVI Intern. Conf. "Complex Systems: Control and Modeling Problems"]. Samara, 2014, pp. 435–443 (In Russian).

ЭВОЛЮЦИОННЫЙ СИНТЕЗ НЕЧЕТКИХ РЕГУЛЯТОРОВ

М. В. Бураков^а, канд. техн. наук, доцент

А. С. Коновалов^а, доктор техн. наук, профессор

О. Б. Яковец^{а, б}, ведущий инженер

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

^бАО «НИИ командных приборов», Санкт-Петербург, РФ

Постановка проблемы: ПИД-регуляторы давно известны и широко используются в промышленности, к их достоинствам относится простота структуры и реализации. Однако для объектов со значительными нелинейностями использование линейных ПИД-регуляторов может не обеспечивать приемлемое качество управления. **Цель:** построение нечетких регуляторов ПИД-типа, настраиваемых с помощью эволюционных алгоритмов и позволяющих улучшить качество работы обычных ПИД-регуляторов. **Результаты:** исследован нечеткий регулятор ПИД-типа с тремя независимыми базами правил. Предложена двухшаговая схема настройки регулятора для нелинейного динамического объекта. На первом шаге генетический алгоритм применяется для настройки линейного ПИД-регулятора, полученные коэффициенты используются на выходе каждого канала нечеткого регулятора ПИД-типа. На втором шаге с помощью генетического алгоритма формируется нелинейная преобразующая функция для каждого канала, реализуемая на базе искусственной нейронной сети. Алгоритм управления отлажен и проверен с помощью системы MatLab. Полученные результаты показывают значительное улучшение характеристик переходного процесса по сравнению с традиционными регуляторами. **Практическая значимость:** нечеткие регуляторы ПИД-типа могут эффективно использоваться при управлении нелинейными объектами в промышленности, что подтверждают рассмотренные в статье примеры.

Ключевые слова — системы управления, нечеткий логический регулятор, ПИД-регулятор, генетический алгоритм.

Введение

Нечетким логическим регулятором (НЛР) называется регулятор, содержащий в своей структуре блок нечеткого логического вывода. Обычно НЛР включаются последовательно с объектом управления, подобно традиционным регуляторам ([1, 2] и др.).

Классическая теория автоматического управления ориентирована в основном на синтез линейных регуляторов на базе линеаризованных моделей, однако все реальные объекты являются нелинейными. Нелинейность математической модели выражается в присутствии статических и динамических нелинейных блоков, таких как «насыщение», «сухое трение», «гистерезис» и т. д. НЛР, нелинейные по своей сути, могут управлять линейными объектами лучше, чем классические регуляторы, а также управлять существенно нелинейными объектами, для которых линейные регуляторы не могут обеспечить приемлемое качество.

Основная проблема использования НЛР заключается в необходимости формализации закона управления в виде нечетких правил, использующих лингвистические переменные для описания входов и выходов регулятора. Первые НЛР использовали опыт эксперта для описания закона управления [3, 4], но этот способ пригоден лишь для ограниченного круга задач. Стандартные варианты описания правил НЛР опираются на анализ фазовой плоскости объекта управления [5]. Могут быть также использова-

ны методы пошаговой настройки НЛР, напоминающие методику Зиглера — Николса для пропорционально-интегрально-дифференциальных (ПИД) регуляторов [6]. Но в общем случае задача настройки НЛР является задачей оптимизации, для решения которой необходима достаточно точная компьютерная модель объекта и мощный алгоритм глобального поиска [7, 8]. При этом ставится задача поиска субоптимального решения, удовлетворяющего пользователя.

Алгоритмы поисковой оптимизации являются предметно-независимыми, успех их применения для настройки НЛР зависит от выбора критерия оптимальности и способа описания параметров регулятора. Рассмотрению этих вопросов посвящена данная работа.

Варианты описания нечеткого регулятора ПИД-типа

Опыт конструирования промышленных систем управления показывает, что поведение многих реальных динамических систем может быть аппроксимировано с помощью передаточных функций первого или второго порядка (возможно — с запаздыванием). Эта особенность привела к широкому распространению ПИД-регуляторов как простого и надежного средства автоматизации [9]. Уравнение ПИД-регулятора имеет вид

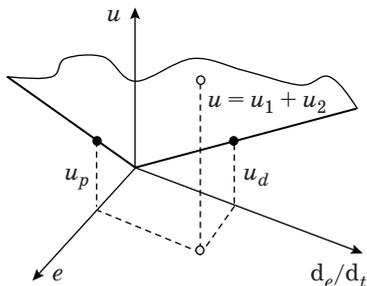
$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(\tau) d\tau + k_d \frac{de(t)}{dt} = u_p + u_i + u_d. \quad (1)$$

Часто используются варианты только из двух слагаемых (1) — пропорционально-дифференциальные (ПД) и пропорционально-интегральные (ПИ) регуляторы. В этом случае возможна наглядная геометрическая интерпретация закона управления, поскольку здесь управляющая поверхность представляет собой плоскость (рис. 1).

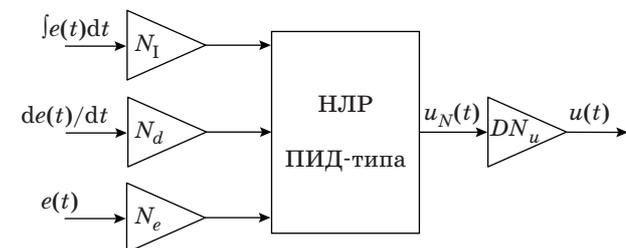
Нечеткий регулятор ПИД-типа получает такие же входные сигналы, как и линейный ПИД-регулятор, но закон управления здесь описывается не гиперплоскостью, а некоторой гиперповерхностью. Классический подход к построению НЛР приводит к использованию управляющих правил с тремя посылками (рис. 2, где N и DN — коэффициенты нормализации и денормализации).

Этот путь неэффективен, поскольку при использовании n термов для описания каждого входа получается n^3 управляющих правил.

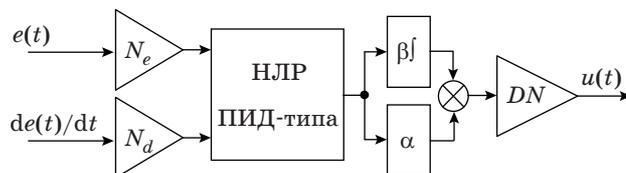
Нечеткие регуляторы ПД- и ПИ-типа получают на входе два сигнала. Можно показать, что если рассматривать на выходе НЛР ПИ-типа не значение выходного сигнала u , а его приращение du , то закон управления НЛР ПИ-типа описывают те же правила, которые использует НЛР ПД-



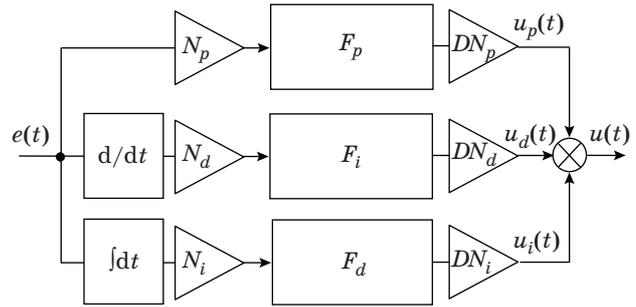
■ Рис. 1. Управляющая поверхность ПД-регулятора



■ Рис. 2. Нечеткий регулятор ПИД-типа с тремя входами



■ Рис. 3. Упрощенное описание НЛР ПИД-типа



■ Рис. 4. Декомпозиция НЛР ПИД-типа

типа [2]. Это позволяет использовать для реализации НЛР ПИД-типа структуру, показанную на рис. 3 (где α и β — неизвестные коэффициенты).

Такое представление достаточно часто используется на практике, количество нечетких правил здесь сокращается до n^2 .

Дальнейшее упрощение описания НЛР ПИД-типа возможно при записи нечеткого закона управления в виде, аналогичном (1):

$$u(t) = F_p(e(t)) + F_i \left(\int_0^t e(\tau) d\tau \right) + F_d \left(\frac{de}{dt} \right), \quad (2)$$

где F_p , F_d и F_i — некоторые нелинейные функции.

При использовании n термов для описания каждого входа здесь требуется всего $3n$ управляющих правил (рис. 4).

Коэффициенты нормализации выбираются исходя из априорных данных о системе управления. Рассматривая задачу синтеза НЛР ПИД-типа как задачу улучшения качества ПИД-регулятора, для выбора коэффициентов денормализации можно использовать следующий алгоритм [10, 11].

1. Синтезируется линейный ПИД-регулятор, параметры которого k_p , k_i , k_d будут играть роль коэффициентов денормализации.

2. Настраиваются нелинейные функциональные зависимости, описывающие нечеткий закон управления по каждой из входных переменных.

Таким образом, на первом шаге получаются базовые коэффициенты усиления, а на втором шаге — дополнительные коэффициенты усиления, нелинейно зависящие от входного сигнала.

Эволюционный синтез нелинейного закона управления

Задача поиска нелинейных зависимостей в (2) может быть решена различными способами, однако наиболее эффективным здесь является использование популяционных метаэвристических методов, таких как генетический алгоритм или метод роя частиц [12].

Применение генетического алгоритма предполагает кодирование параметров задачи с помощью хромосом, составные части которых (гены) соответствуют отдельным параметрам. Совокупность хромосом образует популяцию, эволюционирующую во времени. Цель эволюции — улучшение пригодности хромосом, описывающей качество решения поставленной задачи.

Метод роя частиц рассматривает отдельные параметры задачи в качестве координат поискового пространства. Для каждой точки вычисляется значение целевой функции. Рой частиц движется в поисковом пространстве в направлении экстремума.

При использовании обоих алгоритмов сложность задачи определяется количеством настраиваемых параметров и видом целевой функции.

Для описания нелинейных функций F_p , F_d и F_i можно использовать разные способы, в частности, нейронные *RBF*-сети.

Нейронная *RBF*-сеть является двухслойной, она содержит слой радиально-базисных нейронов и линейный выходной слой [13].

В качестве радиальной базисной функции φ обычно используется гауссова функция

$$\varphi_i(\|x - c_i\|) = \exp\left(-\frac{\|x - c_i\|^2}{2\sigma_i^2}\right),$$

где σ — ширина «окна» активационной функции; c_i — центр активационной *RBF*-функции i -го нейрона; y — входной сигнал.

Выход *RBF*-сети описывается выражением

$$F(t) = \sum_{i=1}^N w_i \varphi_i(t),$$

где w_i — вес нейрона выходного слоя.

Нелинейности F_p , F_d и F_i являются положительными, т. е. произведение любого входного сигнала и соответствующего выходного сигнала положительно. Поэтому каждый нейрон *RBF*-слоя имеет парный нейрон, у которого центр имеет тот же модуль, но другой знак. Это позволяет сократить число настраиваемых параметров.

Таким образом, каждый нейрон имеет два параметра, а третьим параметром является вес выхода нейрона.

Задачу оптимизации можно упростить, если заранее распределить *RBF*-нейроны по базовой шкале и выбрать фиксированную ширину активационных функций. Очевидно, эта операция соответствует лингвистическому описанию входной переменной с помощью набора термов (рис. 5).

Можно также рассмотреть кусочно-линейную аппроксимацию нелинейной функции. Такой вариант можно представить в виде *RBF*-сети, в ко-

торой радиально-базисные нейроны имеют прямоугольные активационные функции, а веса выходного слоя соответствуют коэффициентам усиления линейных участков.

Фактически это означает замену линейного регулятора на множество линейных регуляторов, каждый из которых отвечает за свою область входного пространства.

Обозначив коэффициент усиления каждого линейного участка как w_i , получаем вектор настраиваемых параметров $W = \{w_1, w_2, \dots, w_N\}$.

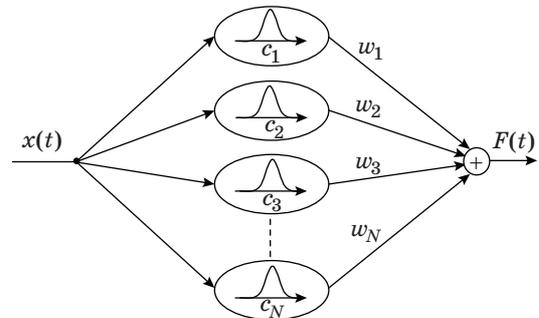
Описание целевой функции удобно выполнить с использованием эталонной модели, описывающей заданные требования к переходному процессу. Целевая функция должна оценивать близость выходов объекта и эталонной модели, например:

$$q(W) = \sum_{i=1}^T |y_i^* - y_i|, \quad (3)$$

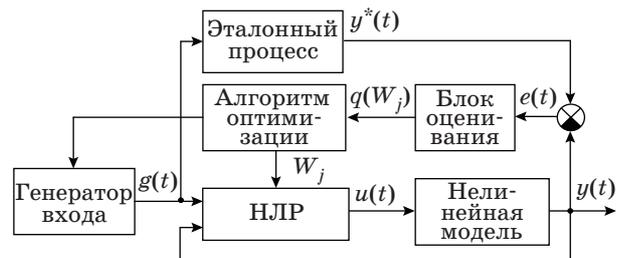
где T — количество моментов времени в течение переходного процесса; y и y^* — реальное и желаемое значение выхода объекта.

Общая схема эволюционной оптимизации НЛР ПИД-типа показана на рис. 6.

Алгоритм оптимизации циклически запускает генератор входа, вырабатывающий тестовое воздействие $g(t)$. При каждом запуске регулятор получает параметры W_j , которым соответствует хромосома генетический алгоритм или коорди-



■ Рис. 5. Аппроксимация статической нелинейности с помощью *RBF*-сети



■ Рис. 6. Эволюционная оптимизация нечеткого регулятора

наты частицы (метод роя частиц). По окончании переходного процесса набор параметров получает оценку пригодности $q(W_i)$. Затем популяция (рой) преобразуется, и происходит новое тестирование. Критерием окончания процесса обычно служит длительное отсутствие улучшений или *исчерпание* количества заданных итераций.

Удобным инструментом реализации описанного подхода является пакет MatLab с расширениями Simulink и GAtool [14].

Примеры реализации

Математическое описание многих промышленных объектов (электрических, электромеханических, гидравлических и т. д.) с одним входом и одним выходом можно представить в виде моделей, содержащих последовательно включенные статическое нелинейное звено и динамическую линейную часть.

Нелинейность типа «насыщение» вводится в модель для учета ограничений уровней переменных при исследовании поведения систем управления в режимах больших отклонений от положения равновесия, а также для описания максимальных уровней управляющего сигнала.

Нелинейный элемент типа «зона нечувствительности» учитывает реальные свойства датчи-

ков, исполнительных механизмов и других устройств при малых входных сигналах.

Схема вычислительного эксперимента представлена на рис. 7.

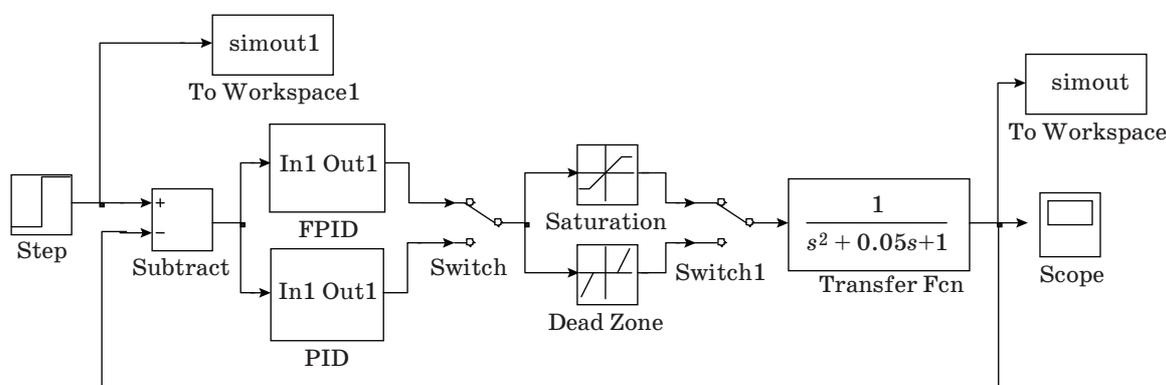
Объект управления представляет собой колебательное звено, на вход которого могут подключаться нелинейности и регулятор выбранного типа. При настройке ПИД-регулятора и НЛР ПИД-типа использовался генетический алгоритм. Блоки *simout* использовались для вычисления (3).

Результаты моделирования для объекта с нелинейностью «насыщение» представлены на рис. 8, *а* и *б*, а для объекта с нелинейностью «зона нечувствительности» — на рис. 9, *а* и *б*.

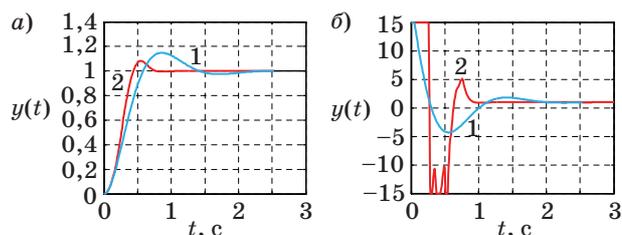
Как следует из рис. 8, *а* и 9, *а*, время переходного процесса сократилось примерно в два раза, хотя при этом растут энергетические затраты на управление (см. рис. 8, *б* и 9, *б*).

Нелинейные функции, описывающие нечеткий закон управления по каждому каналу НЛР ПИД-типа, полученные в результате генетического обучения, показаны на рис. 10.

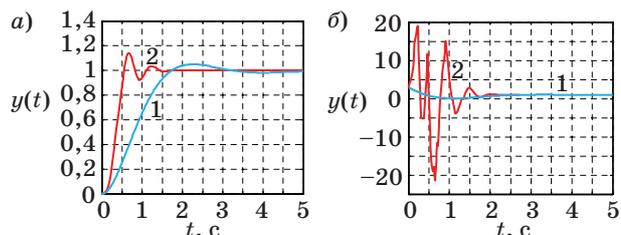
Полученные функции F_p , F_d , F_i оказались существенно различными для объектов с разными нелинейностями. Этот результат предсказуем, поскольку регулятор может рассматриваться в качестве обратной модели объекта.



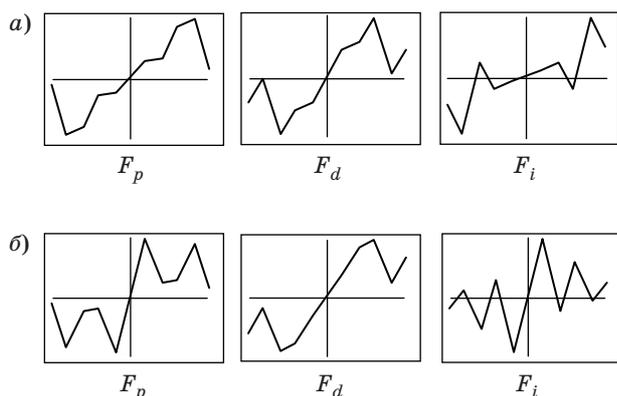
■ Рис. 7. Блок-схема эксперимента в MatLab Simulink



■ Рис. 8. Переходный процесс (*а*) и сигнал управления (*б*) в системе с нелинейностью «насыщение»: 1 — линейный ПИД-регулятор; 2 — нелинейный НЛР ПИД-типа



■ Рис. 9. Переходный процесс (*а*) и сигнал управления (*б*) в системе с нелинейностью «зона нечувствительности»: 1 — линейный ПИД-регулятор; 2 — нелинейный НЛР ПИД-типа



■ **Рис. 10.** Нелинейные отображения по трем каналам НЛР, полученные для объекта с характеристикой «насыщение» (а) и «зона нечувствительности» (б)

Литература

1. Passino K., Yurkovich S. Fuzzy Control. — Reading MA: Addison-Wesley, 1998. — 522 p.
2. Бураков М. В. Нечеткие регуляторы. — СПб.: ГУАП, 2010. — 237 с.
3. Mamdani E. H., Assilian S. An Experiment in Linguistic Synthesis with Fuzzy Logic Controller // Int. J. Man-Machine Studies. 1975. Vol. 7. N 1. P. 1–13.
4. Holmblad L. P., Osregard J. J. Control of Cement Kiln by Fuzzy Logic// Approximate Reasoning in Decision Analysis/ M. M. Gupta and E. Sanchez Eds. — Amsterdam, New York, Oxford, 1982. P. 389–400.
5. Macvicar-Whelan P. J. Fuzzy Sets for Man-Machine Interaction // Int. J. Man-Mach. Studies. 1976. Vol. 8. P. 687–697.
6. Бураков М. В., Коновалов А. С. Синтез нечетких логических регуляторов // Информационно-управляющие системы. 2011. № 1. С. 14–19.
7. Burakov M. V., Konovalov A. S. Peculiarities of Genetic Algorithm Usage when Synthesizing Neural and Fuzzy Regulators // Kluwer Intern. Series in Engineering and Computer Science. 2002. N 664. P. 39–48.
8. Cordon O., Herrera F., Hoffmann F., Magdalena L. Genetic Fuzzy Systems: Evolutionary Tuning and Learning of Fuzzy Knowledge Bases. — Singapore, New Jersey, London, Hong Kong: World Scientific Publishing, 2001. — 462 p.
9. Astrom K. J., Hagglund T. Advanced PID Control. — ISA (The Instrumentation, System, and Automation Society), 2006. — 460 p.
10. Бураков М. В., Кирпичников А. П. Нечеткий регулятор ПИД-типа для нелинейного объекта // Вестник Казанского технологического университета. 2015. Т. 18. № 4. С. 242–244.
11. Бураков М. В., Яковец О. Б. Нечеткое управление силовым гироскопическим прибором // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58. № 10. С. 157–166.
12. Yang X. S. Engineering Optimization: An Introduction with Metaheuristic Applications. — Hoboken: John Wiley & Sons, 2010. — 347 p.
13. Broomhead D. S., Lowe D. Multivariable Functional Interpolation and Adaptive Networks // Complex Systems. 1988. N 2. P. 321–355.
14. Бураков М. В. Генетический алгоритм: теория и практика. — СПб.: ГУАП, 2008. — 164 с.

Заключение

В статье рассмотрен двухшаговый алгоритм эволюционного синтеза НЛР ПИД-типа, который на первом шаге оптимизирует коэффициенты усиления линейного ПИД-регулятора, а на втором шаге — дополнительные коэффициенты усиления, нелинейно зависящие от входного сигнала. Сравнительный анализ результатов моделирования показывает, что использование НЛР ПИД-типа позволяет значительно улучшить параметры переходного процесса.

Предложенная методика отличается простотой и может быть рекомендована к использованию в многочисленных технических приложениях для усовершенствования работы линейных ПИД-регуляторов.

UDC 681.5

doi:10.15217/issn1684-8853.2015.6.28

Evolutionary Design of Fuzzy Controllers

Burakov M. V.^a, PhD, Tech., Associate Professor, bmv@sknt.ru

Konovalov A. S.^a, Dr. Sc., Tech., Professor, ask@aanet.ru

Yakovets O. B.^{a, b}, Senior Engineer, oby@aanet.ru

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

^bCommand Devices Research Institute, 16, Tramvayni Pr., 198216, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: PID controllers are well known and most widely used in the industries due to their simple structure and easy implementation. Nonetheless, linear PID controllers sometimes do not provide good quality of control over non-linear objects. **Purpose:** The

goal of this study is building evolutionary-adjusted fuzzy PID controllers to improve the control performance of the conventional PID controllers. **Results:** A fuzzy PID controller has been studied with three separate rule bases. A two-stage scheme is proposed to adjust the controller for a nonlinear dynamic plant. At the first stage, a genetic algorithm is used to adjust a linear PID controller. The obtained PID coefficients are used as fuzzy PID output scaling factors. At the second stage, the genetic algorithm is used to form a nonlinear mapping function for every channel, implemented on the base of an artificial neural network. The proposed control algorithm has been validated with MatLab. The obtained results demonstrate that the proposed controller provides excellent dynamic and steady-state characteristics as compared to the traditional controllers. **Practical relevance:** Fuzzy PID controllers are suitable for the control over nonlinear plants in industrial applications, as demonstrated by the examples in this paper.

Keywords — Control Systems, Fuzzy Logic Controller, PID Controller, Genetic Algorithm.

References

1. Passino K., Yurkovich S. *Fuzzy Control*. Addison-Wesley, NJ, 1998. 522 p.
2. Burakov M. V. *Nechetkie regulatory* [Fuzzy Controllers]. Saint-Petersburg, GUAP Publ., 2010. 237 p. (In Russian).
3. Mamdani E. H., Assilian S. An Experiment in Linguistic Synthesis with Fuzzy Logic Controller. *Int. J. Man-Machine Studies*, 1975, vol. 7, no. 1, pp. 1–13.
4. Holmblad L. P., Osregard J. J. Control of Cement Kiln by Fuzzy Logic. In: *Approximate Reasoning in Decision Analysis*. M. M. Gupta and E. Sanchez Eds. Amsterdam, New York, Oxford., 1982, pp. 389–400.
5. Macvicar-Whelan P. J. Fuzzy Sets for Man-Machine Interaction. *Int. J. Man-Mach. Studies*, 1976, vol. 8, pp. 687–697.
6. Burakov M. V., Kononov A. S. Fuzzy Controller Design. *Informatsionno-upravliayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2011, no. 1, pp. 14–19 (In Russian).
7. Burakov M. V., Kononov A. S. Peculiarities of Genetic Algorithm Usage when Synthesizing Neural and Fuzzy Regulators. *Kluwer International Series in Engineering and Computer Science*, 2002, no. 664, pp. 39–48.
8. Cordon O., Herrera F., Hoffmann F., Magdalena L. *Genetic Fuzzy Systems: Evolutionary Tuning and learning of Fuzzy Knowledge Bases*. Singapore, New Jersey, London, Hong Kong, World Scientific Publishing, 2001. 462 p.
9. Astrom K. J., Hagglund T. *Advanced PID Control*. ISA (The Instrumentation, System, and Automation Society), 2006. 460 p.
10. Burakov M. V., Kirpichnikov A. P. Fuzzy PID Controller for Nonlinear Plant. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2015, vol. 18, no. 4, pp. 242–244 (In Russian).
11. Burakov M. V., Yakovets O. B. Fuzzy Control of Power Gyroscopic Unit. *Izvestiia vuzov. Priborostroenie*, 2015, vol. 58, no. 10, pp. 157–166 (In Russian).
12. Yang X. S. *Engineering Optimization: An Introduction with Metaheuristic Applications*. Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, 2010. 347 p.
13. Broomhead D. S., Lowe D. Multivariable Functional Interpolation and Adaptive Networks. *Complex Systems*, 1988, no. 2, pp. 321–355.
14. Burakov M. V. *Geneticheskii algoritm: Teoriia i praktika* [Genetic Algorithm: Theory and Practice]. Saint-Petersburg, GUAP Publ., 2008. 164 p. (In Russian).

К статье

М. А. Гранкина «Модель для оценки среднего количества активных абонентов в системе межмашинного взаимодействия в сетях 5-го поколения» (*Информационно-управляющие системы*. 2015. № 5. С. 72–81).

На странице 72, левый столбец, в сноске следует читать: «Научный руководитель — доцент, доктор технических наук, заведующий кафедрой инфокоммуникационных систем Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения А. М. Тюрликов.»

КОРРЕКЦИЯ КУРСА ИНЕРЦИАЛЬНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ДО ВЗЛЕТА САМОЛЕТА ПО ИНФОРМАЦИИ ОТ СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

В. В. Маркелов^а, ведущий инженер-программист

М. О. Костишин^{а, б}, аспирант, старший инженер

А. В. Шукалов^{а, б}, канд. техн. наук, доцент, генеральный директор

^аАО «ОКБ «Электроавтоматика», Санкт-Петербург, РФ

^бСанкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, РФ

Постановка проблемы: при проведении сокращенной автономной подготовки к вылету самолета, оснащенного инерциальной навигационной системой на базе платформенной инерциальной курсовертикали, возникает проблема недостаточной точности определения начального азимута и, как следствие, курса объекта. Это обуславливает необходимость проведения дополнительной коррекции курса до взлета. В качестве варианта рассматривается возможность использования для коррекции курса информации, получаемой от спутниковой навигационной системы. **Результаты:** представлен метод коррекции курса до взлета самолета инерциальной навигационной системы по информации от спутниковой навигационной системы. Коррекция курса включает в себя определение расчетной курсовой ошибки на прямолинейных участках руления до взлета с последующим ее вводом в виде поправки в бортовую цифровую вычислительную машину для использования в текущем полете. Расчет курсовой ошибки осуществляется путем статистической оценки сравнения путевого угла, определяемого по информации спутниковой навигационной системы, с текущим курсом, измеренным инерциальной навигационной системой. Сравнение производится по заданному количеству замеров на реализуемом интервале времени. Приведены результаты отработки метода на испытательном стенде с оценкой его точностных характеристик. **Практическая значимость:** коррекция курса по информации спутниковой навигационной системы до взлета может использоваться в целях повышения точностных характеристик определения курса самолета после проведения сокращенных видов подготовки бортовых инерциальных систем с неточной выставкой начального азимута.

Ключевые слова — коррекция курса, инерциальная навигационная система, спутниковая навигационная система.

Введение

Точность определения курса самолета, оснащенного инерциальной навигационной системой (ИНС), в первую очередь определяется точностью начальной выставки данной системы в азимуте.

Наиболее широкое применение из вариантов выставки ИНС на базе платформенной инерциальной курсовертикали в азимуте нашел способ гирокомпасирования, обеспечивающий необходимые и достаточные точностные характеристики определения стояночного курса. Однако данный способ обладает одним существенным недостатком для ИНС, заключающимся в длительности процесса гирокомпасирования, составляющей 10–20 мин.

При необходимости сократить время подготовки к вылету до 3–5 мин применяются следующие способы определения начального положения инерциальной системы по азимуту, не требующие наличия дополнительных приспособлений, ориентиров или точной привязки самолета к месту стоянки: определение магнитного курса с помощью индукционного датчика с последующим переводом в истинный курс с учетом задаваемого магнитного склонения и использование последнего сохраненного бортовым навигационным ком-

плексом значения курса после постановки объекта на место стоянки.

При явном преимуществе во времени подготовки точность данных способов составляет порядка 1° , что является недостаточно удовлетворительным значением для решения ряда целевых задач. Компенсация курсовой ошибки осуществляется обычно при использовании дополнительной коррекции курса по взлетно-посадочной полосе, при движении по осевой линии рулежной дорожки и разбеге.

В качестве альтернативного метода уточнения значения курса после сокращенной подготовки к вылету предложен вариант коррекции курса по информации спутниковой навигационной системы (СНС) до взлета.

Использованию коррекции курса по информации СНС способствует развертывание в полном объеме спутниковой орбитальной группировки ГЛОНАСС, позволяющей потребителям получать измеряемые параметры с требуемой точностью.

Коррекция курса по информации СНС до взлета

Коррекция курса по информации СНС основана на допущении о равенстве путевого угла

истинному курсу на прямолинейных участках руления самолета. При этом необходимо иметь в виду, что данное допущение может соблюдаться с определенной погрешностью, обусловленной конструктивными особенностями самолета.

При коррекции курса на участках руления обеспечивается определение текущего путевого угла по информации СНС и его сравнение с текущим курсом, измеренным ИНС.

Принимается, что погрешности измерения путевых скоростей и, соответственно, путевого угла по информации СНС при прямолинейном движении самолета по земле подчинены нормальному закону распределения с околонулевым математическим ожиданием (что приемлемо при работе СНС в режиме ГЛОНАСС или GPS (с выключенным селективным доступом)) [1].

Также принимается, что колебания измеренного ИНС курса относительно фактического путевого угла при движении самолета подчинены нормальному закону распределения при отсутствии заметного дрейфа ИНС в азимуте.

Таким образом, математическое ожидание рассогласования курса, измеренного ИНС, и путевого угла, рассчитанного по информации СНС, может быть принято в качестве курсовой ошибки ИНС.

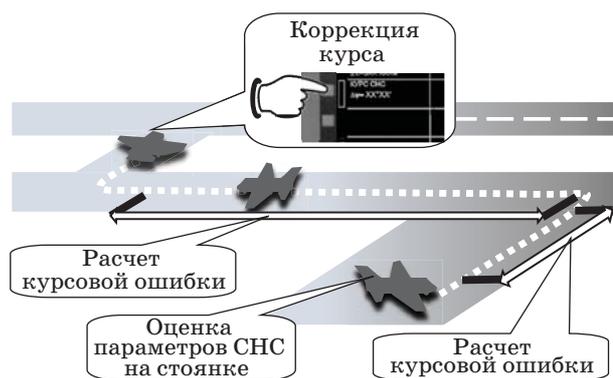
В качестве критерия, позволяющего принимать математическое ожидание рассогласования измеренного ИНС курса и рассчитанного по информации СНС путевого угла как курсовую ошибку, используются следующие условия: соответствие рассогласования нормальному закону распределения; соответствие дисперсии рассогласования сумме дисперсий от измерения путевого угла по информации СНС и измерения ИНС курса относительно фактического путевого угла при движении самолета; обеспечение количеством замеров рассогласования приемлемого значения точности.

Реализация и отработка режима коррекции курса по информации СНС

Для отработки коррекции курса по информации СНС данный режим был интегрирован в программное обеспечение бортового комплекса самолета типа Л-39 [1–4].

Расчеты режима проводились бортовой цифровой вычислительной машиной с регистрацией результатов на бортовом накопителе и последующей их обработкой на наземном автоматизированном рабочем месте [5, 6].

Схема функционирования режима коррекции курса по информации СНС (рис. 1) состоит из этапа оценки параметров СНС на стоянке и этапа расчета курсовой ошибки на участках руления. Инициализация рассчитанной курсовой поправ-



■ Рис. 1. Схема функционирования режима коррекции курса

ки проводится в ручном режиме с помощью многофункционального индикатора [7–14].

Для оценки режима в качестве исходной использовалась информация СНС в режиме ГЛОНАСС+GPS с частотой измерения параметров 10 Гц при геометрическом факторе не более двух при наличии контроля целостности и непрерывности измеренных СНС данных.

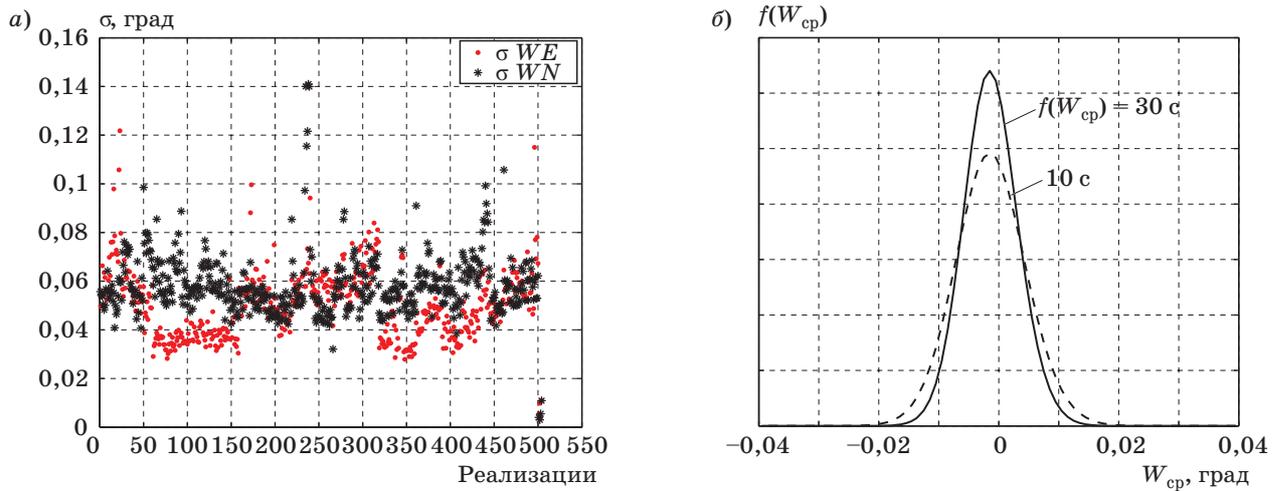
Параметры СНС на стоянке оценивались на непрерывном интервале измерений в течение 10–30 с при значениях путевых скоростей СНС, не превышающих 0,2 м/с. Оцениваемыми параметрами являются составляющие скорости по информации СНС, определяющие заданный путевой угол [15].

Погрешности измерения северной (WN) и восточной (WE) составляющих скорости по информации СНС (σ), полученные на интервалах измерений 10–30 с, и кривые распределения выборочного среднего (W_{cp}) величины суммарной скорости на интервалах измерений 10 и 30 с представлены на рис. 2, а и б, где $f(W_{cp})$ — плотность распределения. Результаты получены по более чем 500 реализациям, разнесенным по времени и месту.

Погрешности измерения составляющих скорости по информации СНС соответствуют заявленным характеристикам при работе СНС в режиме ГЛОНАСС (при стандартной точности) и при работе в режиме GPS (при отсутствии селективного доступа) до 0,2 м/с (2σ).

Погрешность оценки математического ожидания с вероятностью 0,97 не превысит 0,01 м/с на непрерывном интервале измерений в течение 30 с. Данное значение использовано в качестве необходимого условия для осуществления коррекции курса по информации СНС.

Расчет курсовой ошибки осуществлялся на прямолинейных участках движения самолета, характеризующихся отсутствием признака поворота и путевой скоростью, измеренной СНС, превышающей заданное пороговое значение, по-



■ **Рис. 2.** Погрешности измерения составляющих скорости по информации СНС (а) и кривые распределения выборочного среднего величины суммарной скорости СНС (б)

звляющее получить достаточную точность расчета путевого угла. По результатам отработки в качестве признака поворота принималась скорость изменения курса ИНС более 1°/с; пороговое значение скорости — 6 м/с.

Дискретная курсовая ошибка определялась как разница измеренного ИНС курса и рассчитанного по составляющим путевой скорости СНС путевого угла по формуле

$$\Delta\psi_i = \Delta\psi_i^{\text{ИНС}} - \arctg(WE_i / WN_i),$$

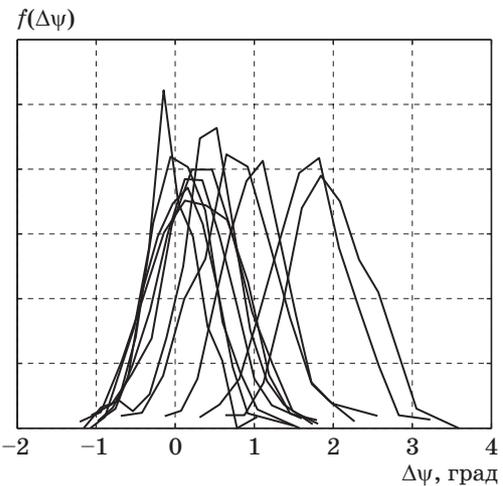
где $\Delta\psi_i$ — дискретная курсовая ошибка на i -м цикле расчета; $\Delta\psi_i^{\text{ИНС}}$ — истинный курс, измеренный ИНС; WE_i, WN_i — северная и восточная составляющие путевой скорости СНС.

Кривые распределения курсовой ошибки для 11 реализаций с более чем 400 циклами замеров погрешности в каждой при суммарном времени руления от 20 до 120 с представлены на рис. 3, где $f(\Delta\psi)$ — плотность распределения. Данные кривые соответствуют нормальному закону распределения с несущественным отклонением от него, обусловленным эксплуатационными характеристиками самолета при движении и характеристиками окружающей среды. При этом значение амплитуды колебания измеренного ИНС курса относительно фактического путевого угла при движении самолета составило до 1°.

Искомая курсовая ошибка ИНС, рассчитанная по информации СНС, представляет собой выборочное среднее как оценку математического ожидания и определяется постоянно на прямолинейных участках движения самолета по формуле

$$\Delta\psi_{cp_i} = \Delta\psi_{cp_{i-1}} + (\Delta\psi_i - \Delta\psi_{cp_{i-1}}) / i,$$

где $\Delta\psi_{cp_i}$ — курсовая ошибка после i -го цикла расчета; $\Delta\psi_{cp_{i-1}}$ — курсовая ошибка после $(i - 1)$ -го цикла расчета.



■ **Рис. 3.** Распределение курсовой ошибки

Для определения достаточности количества замеров используется расчет точности измерения курсовой ошибки ϵ [15]

$$\epsilon^2 = 1,96^2 \sigma_i^2 / (i - 1),$$

где дисперсия

$$\sigma_i^2 = \sigma_{i-1}^2 (i - 2) / (i - 1) + (\Delta\psi_i - \Delta\psi_{cp_{i-1}})^2 / i.$$

Величина 1,96 для нормального закона распределения определяет размер интервала замеров, характеризующегося вероятностью попадания в него 0,95.

По результатам отработки достаточной точностью измерения курсовой ошибки считаются 0,05°, что в среднем соответствует более 400 циклам расчета погрешности измерения курса.

Критерием качества процедуры коррекции выбрано среднее квадратическое отклонение курсовой ошибки на интервале измерений. Его допу-

стимое значение, по результатам обработки, не должно превышать $0,3^\circ$.

Значение данного среднего квадратического отклонения определяется из формулы

$$\sigma[\Delta\psi_{\text{ср}}]_i^2 = \sigma[\Delta\psi_{\text{ср}}]_{i-1}^2 (i-2)/(i-1) + (\Delta\psi_{\text{ср}i} - M[\Delta\psi_{\text{ср}}]_{i-1})^2 / i,$$

где $\sigma[\Delta\psi_{\text{ср}}]_i$ — среднее квадратическое отклонение курсовой ошибки на интервале измерений до i -го цикла расчета [15]; $M[\Delta\psi_{\text{ср}}]_i = M[\Delta\psi_{\text{ср}}]_{i-1} + (\Delta\psi_{\text{ср}i} - M[\Delta\psi_{\text{ср}}]_{i-1})/i$.

Оценка режима коррекции курса по информации СНС выполнялась сравнением откорректированного по информации СНС курса, приведенного к месту стоянки, с эталонным значением.

В качестве эталонного принималось значение стояночного курса, определенное с помощью теодолита.

Погрешность, полученная при коррекции курса по информации СНС по всем реализациям, не превысила $20'$, что делает целесообразным применение данной коррекции при неточной выставке инерциальной системы по азимуту.

По результатам наземной обработки режим коррекции курса по информации СНС был рекомендован к применению для уточнения курса самолета после проведения ускоренной подготовки ИНС с определением начального азимута по магнитному корректору.

Заключение

Коррекция курса до взлета по информации СНС может быть рекомендована к использованию с целью повысить точностные характеристики определения курса самолета, оснащенного ИНС на базе платформенной инерциальной курсовертикали, после проведения сокращенной подготовки с выставкой начального азимута по датчику магнитного курса.

Значение курсовой поправки для коррекции определяется при рулении самолета в течение не менее 20 с при работе бортовой СНС в режиме ГЛОНАСС или GPS (при отсутствии селективного доступа) и наличии контроля целостности используемых данных, а также при использовании дополнительного контроля измеряемых и вычисляемых параметров. При этом погрешность определения курсовой поправки не превысит $20'$.

Литература

1. Харин Е. Г. Комплексная обработка информации навигационных систем летательных аппаратов. Опыт многолетнего практического применения. — М.: МАИ, 2002. — 264 с.
2. Парамонов П. П., Жаринов И. О. Интегрированные бортовые вычислительные системы: обзор современного состояния и анализ перспектив развития в авиационном приборостроении // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. № 2. С. 1–17.
3. Гачин Ю. А., Жаринов И. О. Основы проектирования вычислительных систем интегрированной модульной авионики. — М.: Машиностроение, 2010. — 224 с.
4. Синяков А. Н., Мамаев В. Я., Парамонов П. П., Есин Ю. Ф. Интеллектуальные навигационные датчики в автоматизированных обучающих системах // Датчики и системы. 2001. № 8. С. 27–29.
5. Харин Е. Г., Копылов И. А., Копелович В. А., Ясенок А. В. Технология автоматизированного оценивания самолетовождения по стандартным маршрутам вылета и прибытия // Сб. тр. XXII Междунар. конф. по интегрированным навигационным системам. СПб.: «ЦНИИ «Электроприбор», 2015. С. 157–161.
6. Харин Е. Г., Копылов И. А. Технологии летных испытаний бортового оборудования летательных

- аппаратов с применением комплекса бортовых траекторных измерений. — М.: МАИ-ПРИНТ, 2012. — 360 с.
7. Парамонов П. П., Копорский Н. С., Видин Б. В., Жаринов И. О. Многофункциональные индикаторы на плоских жидкокристаллических панелях: наукоемкие аппаратно-программные решения // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2004. № 3. С. 238–245.
8. Парамонов П. П. и др. Принцип формирования и отображения массива геоинформационных данных на экран средств бортовой индикации / П. П. Парамонов, М. О. Костишин, И. О. Жаринов, В. А. Нечаев, С. А. Сударчиков // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. № 6. С. 136–142.
9. Парамонов П. П. и др. Реализация структуры данных, используемых при формировании индикационного кадра в бортовых системах картографической информации / П. П. Парамонов, П. В. Коновалов, И. О. Жаринов, Ю. А. Кирсанова, С. Б. Уткин // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. № 2. С. 165–167.
10. Костишин М. О. и др. Оценка точности визуализации местоположения объекта в геоинформационных системах и системах индикации навигационных комплексов пилотируемых летательных

ных аппаратов / М. О. Костишин, И. О. Жаринов, О. О. Жаринов, В. А. Нечаев, В. Д. Суслов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2014. № 1. С. 87–93.

11. Жаринов И. О., Жаринов О. О. Бортовые средства отображения информации на плоских жидкокристаллических панелях: учеб. пособие. — СПб.: ГУАП, 2005. — 144 с.
12. Парамонов П. П., Ильченко Ю. А., Жаринов И. О. Теория и практика статистического анализа картографических изображений в системах навигации пилотируемых летательных аппаратов // Датчики и системы. 2001. № 8. С. 15–19.
13. Kostishin M. O., Zharinov I. O. Precision Characteristics of the Positioning of Objects in Aircraft Geoin-

formation Systems // Automation & Control: Proc. of the Intern. Conf. of Young Scientists «ISCAC-2013», Saint-Petersburg, 21–22 Nov. 2013. Saint-Petersburg: National Research University of Saint-Petersburg State Polytechnical University, 2013. P. 92–96.

14. Парамонов П. П., Ильченко Ю. А., Жаринов И. О., Тарасов П. Ю. Структурный анализ и синтез графических изображений на экранах современных средств бортовой индикации на плоских жидкокристаллических панелях // Авиакосмическое приборостроение. 2004. № 5. С. 50–57.
15. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. — М.: Наука, 1969. — 576 с.

UDC 629.051

doi:10.15217/issn1684-8853.2015.6.34

Aircraft Inertial Navigation System Pre-takeoff Course Correction by Information from a Satellite Navigation System

Markelov V. V^a, Senior Software Engineer, vvmarkel@gmail.com

Kostishin M. O.^{a, b}, Assistant, Engineer, maksim@kostishin.com

Shukalov A. V.^{a, b}, PhD, Tech., Associate Professor, Director General, aviation78@mail.ru

^aSaint-Petersburg Scientific Design Bureau «Electroavtomatika», 40, Marshala Govorova St., 198095, Saint-Petersburg, Russian Federation

^bSaint-Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, 49, Kronverkskii St., 197101, Saint-Petersburg, Russian Federation

Purpose: During a shortened standalone takeoff preparation of an aircraft with an inertial navigation system based on a platform inertial AHRS, there is a problem of insufficient accuracy of initial azimuth determination and, consequently, the object course. This necessitates an additional course correction before the takeoff. A possible option is using the information received from a satellite navigation system. **Results:** A pre-takeoff course correction method is proposed which uses the information from a satellite navigation system. The correction includes the determination of the estimated course error on the straight sections of the taxiing before the takeoff and its subsequent input as an amendment into the onboard digital computer to use it during the flight. The error is calculated by statistical evaluation, comparing the track angle determined using the satellite navigation system information with the current course measured by the inertial navigation system. The comparison is made for several measurements within a certain time interval. Test-bench results of the method's application are given, along with the evaluation of its accuracy. **Practical relevance:** Pre-takeoff satellite-driven course correction can be used to improve the accuracy of determining the course of an aircraft after a shortened preparation of the onboard inertial systems with the initial azimuth set up inaccurately.

Keywords — Course Correction, Inertial Navigation System, Satellite Navigation System.

Reference

1. Kharin E. G. *Kompleksnaia obrabotka informatsii navigatsionnykh sistem letatel'nykh apparatov. Opyt mnogoletnego prakticheskogo primeneniia* [Complex Information Processing of Aircraft Navigation Systems]. Moscow, MAI Publ., 2002. 264 p. (In Russian).
2. Paramonov P. P., Zharinov I. O. Integrated On-board Computing Systems: Present Situation Review and Development Prospects Analysis in the Aviation Instrument-making Industry. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki*, 2013, no. 2, pp. 1–17 (In Russian).
3. Gatchin Yu. A., Zharinov I. O. *Osnovy proektirovaniia vychislitel'nykh sistem integrirovannoi modul'noi avioniki* [Basics of Designing Computer Systems Integrated Modular Avionics], Moscow, Mashinostroenie Publ., 2010. 224 p. (In Russian).
4. Siniakov A. N., Mamaev V. Ia., Paramonov P. P., Esin Iu. F. Intellectual Navigation Sensors in Automated Training Systems. *Datchiki i sistemy*, 2001, no. 8, pp. 27–29 (In Russian).
5. Kharin E. G., Kopylov I. A., Kopelovich V. A., Yasenok A. V. Automatic Evaluation of Aircraft Navigation along Standard Instrument Departure and Arrival Routes. *Trudy XXII Mezhdunarodnoi konferentsii po integrirovannym navigatsionnym sistemam* [Proc. of XXII Saint-Petersburg Intern. Conf. on Integrated Navigation Systems]. Saint-Petersburg, TsNII Elektropribor Publ., 2015, pp. 176–180 (In Russian).
6. Kharin E. G., Kopylov I. A. *Tekhnologii letnykh ispytaniia bortovogo oborudovaniia letatel'nykh apparatov s primeneniem kompleksa bortovyykh traektornykh izmerenii* [Technology Avionics Flight Test using a Set of on-board Measurement]. Moscow, MAI-PRINT Publ., 2012. 360 p. (In Russian).
7. Paramonov P. P., Kopersky N. S., Vidin B. V., Zharinov I. O. Implementation of Data Structure in Indication Frame Formation for Onboard Geospatial Data Computer Systems. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki*, 2004, no. 3, pp. 238–245 (In Russian).
8. Paramonov P. P., Kostishin M. O., Zharinov I. O., Nechaev V. A., Sudarchikov S. A. Formation and Display Principles for an Array of Geoinformation Data by Means of Onboard Display Screen. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki*, 2013, no. 6, pp. 136–142 (In Russian).

9. Paramonov P. P., Konovalov P. V., Zharinov I. O., Kirsanova Yu. A., Utkin S. B. Implementation of Data Structure in Indication Frame Formation for Onboard Geospatial Data Computer Systems. *Nauchno-tehnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki*, 2013, no. 2, pp. 165–167 (In Russian).
10. Kostishin M. O., Zharinov I. O., Zharinov O. O., Nechaev V. A., Suslov V. D. Accuracy Evaluation of the Object Location Visualization for Geo-information and Display Systems of Manned Aircraft Navigation Complexes. *Nauchno-tehnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki*, 2014, no. 1, pp. 87–93 (In Russian).
11. Zharinov I. O., Zharinov O. O. *Bortovye sredstva otobrazheniia informatsii na ploskikh zhidkokristallicheskikh paneliakh* [Onboard Display on Flat Liquid Crystal Panels]. Saint-Petersburg, GUAP Publ., 2005. 144 p. (In Russian).
12. Paramonov P. P., Il'chenko Yu. A., Zharinov I. O. Theory and Practice of Statistical Analysis of Cartographic Images in Navigation Systems Manned Aircraft. *Datchiki i sistemy* [Sensors and Systems], 2001, no. 8, pp. 15–19 (In Russian).
13. Kostishin M. O., Zharinov I. O. Precision Characteristics of the Positioning of Objects in Aircraft Geoinformation Systems. *Automation & Control: Proc. of the Intern. Conf. of Young Scientists "ISCAC-2013"*, Saint-Petersburg, National Research University of Saint-Petersburg State Polytechnical University Publ., 2013, pp. 92–96.
14. Paramonov P. P., Il'chenko Yu. A., Zharinov I. O., Tarasov P. Yu. Structural Analysis and Synthesis of Graphic Images on the Screens of Modern On-board Display on Flat Liquid Crystal Panels. *Aviakosmicheskoe priborostroenie*, 2004, no. 5, pp. 50–57 (In Russian).
15. Ventscel' E. S. *Teoriia veroiatnosti* [Probability Theory]. Moscow, Nauka Publ., 1969. 576 p. (In Russian).

К статье

Е. А. Барковского, А. В. Соколова «Оптимальное управление двумя параллельными FIFO-очередями на бесконечном времени» (*Информационно-управляющие системы*. 2015. № 5. С. 65–71).

Исправления авторов. На странице 70 в таблице «Сравнение потерь» в столбце «Входные данные», начиная с третьей строки, значения вероятностей приведены неправильные. Следует читать:

■ **Сравнение потерь**

Входные данные	Величина потерь при переполнении ($m = 10$)	
	Оптимальное разбиение	Разбиение пополам ($s = 5$)
$p_1 = 0,25, p_2 = 0,25,$ $p_{12} = 0,25, r_1 = 0,25,$ $q_1 = q_2 = q_{12} = r_2 = 0,25$	0,089 ($s = 5$)	0,089
$p_1 = 0,30, p_2 = 0,20,$ $p_{12} = 0,10, r_1 = 0,40,$ $q_1 = q_2 = q_{12} = r_2 = 0,25$	0,012 ($s = 6$)	0,014
$p_1 = 0,35, p_2 = 0,15,$ $p_{12} = 0,10, r_1 = 0,40,$ $q_1 = q_2 = q_{12} = r_2 = 0,25$	0,019 ($s = 7$)	0,025
$p_1 = 0,40, p_2 = 0,10,$ $p_{12} = 0,10, r_1 = 0,40,$ $q_1 = q_2 = q_{12} = r_2 = 0,25$	0,035 ($s = 7$)	0,046
$p_1 = 0,45, p_2 = 0,05,$ $p_{12} = 0,10, r_1 = 0,40,$ $q_1 = q_2 = q_{12} = r_2 = 0,25$	0,064 ($s = 8$)	0,075

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕХМЕРНЫХ СЦЕН ЛЕСНЫХ УЧАСТКОВ ПО ДАННЫМ ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ И АЭРОФОТОСНИМКАМ

А. А. Ткачева^а, аспирант

М. Н. Фаворская^а, доктор техн. наук, профессор

^аСибирский государственный аэрокосмический университет им. академика М. Ф. Решетнёва, Красноярск, РФ

Постановка проблемы: визуализация растительности в трехмерных ландшафтных сценах является нетривиальной задачей в силу сложной структуры ветвления у различных пород деревьев. Пакеты общего назначения не позволяют разрабатывать модели растительности без определенных навыков работы. Специальные пакеты, такие как геоинформационные системы, используют укрупненные графические примитивы для описания формы крон деревьев. В связи с этим возникает задача разработки правил ветвления как для хвойных, так и для широколиственных пород деревьев. **Результаты:** описан процесс моделирования трехмерных сцен лесных участков по данным лазерного сканирования и аэрофотоснимкам, которые дают информацию о форме кроны дерева, высоте лесного полога и типе ландшафта с применением правил классификации лазерных данных. Правила построены на разбиении исходного облака точек на трехмерные кубы — воксели. Разработаны правила ветвления для различных пород деревьев на основе L-систем, которые используются для прорисовки базового каркаса модели дерева. Для детального построения кроны дерева используется алгоритм Space Colonization. **Практическая значимость:** полученные правила классификации данных лазерного сканирования позволяют создавать высокоточные модели естественных ландшафтных сцен лесной растительности для визуализации данных.

Ключевые слова — трехмерное моделирование, лазерное сканирование, аэрофотоснимки, совмещение данных, моделирование деревьев, моделирование лесных участков.

Введение

Моделирование трехмерных сцен лесных участков является современной технологией анализа множественных морфологических показателей леса при мониторинге и планировании лесохозяйственных работ. Такая технология объединяет достижения лазерного сканирования, аэрофотосъемки, цифровой обработки изображений и методов 3D-моделирования. К известным подходам трехмерного моделирования относятся: подход на основе математического описания с использованием различных грамматик, в том числе и L-системы [1–3]; подход на основе восстановления сцены по ряду изображений [4–6], а также многочисленные эвристические подходы, требующие моделирования отдельных элементов сцены или участков сцены вручную с использованием известных пакетов трехмерного моделирования, как коммерческих (Maya, 3dsMax, Cinema 4D, ZBrush, VuxStream), так и свободно распространяемых (Blender, Sculptor), или редакторов собственной разработки [7, 8]. Исходными данными при моделировании ландшафта выступают данные воздушного лазерного сканирования (Light Detection And Ranging — LiDAR), наземного лазерного сканирования (Terrestrial LiDAR — TLiDAR), аэрофотосъемки и таксации лесных массивов (обмеры стволов деревьев, карта высот лесного участка и др.).

Трехмерная сцена лесного ландшафта, как правило, включает в себя следующие объекты: деревья различных пород, кустарники, подлесок и участки Земли. В данной работе используется информация воздушного лазерного сканирования. Лазерная съемка лесного участка позволяет получить массив трехмерных координат точек лазерного сканирования. Для последующего моделирования сцены необходимо классифицировать исходное облако точек на точки, принадлежащие поверхности Земли, и точки, относящиеся к растительности. Существует несколько методов классификации исходного облака точек [9].

Метод определения минимумов ячеек сетки основан на том, что точки земной поверхности имеют наименьшие значения координаты z относительно других объектов. Метод целесообразно использовать для прореживания облака точек в качестве предварительной обработки данных.

Метод линейного вычисления превышений построен на предположении, что две точки принадлежат к профилю Земли в случае, если наклон, а следовательно, и высота между двумя соседними точками не превышают некоторого заданного порогового значения.

Интерполяционный метод (итеративный) предполагает подбор интерполяционной поверхности к исходному облаку точек.

Постановка задачи разбиения исходного облака точек

Пусть VL — это множество трехмерных точек воздушного лазерного сканирования участка лесной поверхности:

$$VL = \left\{ \begin{array}{l} (x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2), \dots, \\ (x_n, y_n, z_n), \dots, (x_{N_L}, y_{N_L}, z_{N_L}) \end{array} \right\},$$

где $n \in 1 \dots N_L$, N_L — общее количество точек лазерного сканирования.

Множество VL включает множество точек T , относящихся к растительности моделируемой сцены:

$$T = T_1 \cup T_2 \cup \dots \cup T_{N_t},$$

$$T_1 = \left\{ \begin{array}{l} (x_{11}, y_{11}, z_{11}), (x_{12}, y_{12}, z_{12}), \dots, \\ (x_{1n}, y_{1n}, z_{1n}), \dots \end{array} \right\},$$

$$T_{N_t} = \left\{ \begin{array}{l} (x_{N_t1}, y_{N_t1}, z_{N_t1}), (x_{N_t2}, y_{N_t2}, z_{N_t2}), \dots, \\ (x_{N_tn}, y_{N_tn}, z_{N_tn}), \dots \end{array} \right\},$$

где N_t — количество объектов-деревьев в сцене, и множество точек поверхности Земли L :

$$L = \left\{ \begin{array}{l} (x_{L1}, y_{L1}, z_{L1}), (x_{L2}, y_{L2}, z_{L2}), \dots, \\ (x_{Ln}, y_{Ln}, z_{Ln}), \dots, (x_{LN}, y_{LN}, z_{LN}) \end{array} \right\},$$

где $Ln \in 1 \dots LN$, LN — общее количество точек лазерного сканирования, относящихся к поверхности Земли.

Таким образом, множества T и L являются непесекающимися подмножествами множества VL :

$$VL = T \cup L \cup E,$$

где E — множество ошибочных измерений (шумы и помехи).

Необходимо из исходного облака точек воздушного лазерного сканирования множества VL выделить подмножества L и T — множество точек поверхности Земли и множество точек растительности соответственно и по полученным множествам построить трехмерную модель лесного участка.

Обработка данных лазерного сканирования

Известны два основных способа лазерного сканирования ландшафта — воздушное (LiDAR) и наземное (TLiDAR). Воздушное лазерное сканирование выполняется с какого-либо воздушного судна, обычно самолета или вертолета. Принцип функционирования воздушных лазерных сканеров основан на излучении лазерного луча до объекта местности и регистрации отраженных сигналов в обратном направлении. Сканирование

поперек направления движения носителя выполняется путем отклонения лазерного луча при помощи сканирующего механизма, а вдоль направления движения — вследствие перемещения носителя. Сущность наземного лазерного сканирования заключается в регистрации с высокой скоростью расстояния от сканера до поверхности объекта и регистрации соответствующих направлений (вертикальных и горизонтальных углов) с последующим формированием трехмерного изображения (скана) в виде облака точек.

Обработка данных лазерного сканирования проводится в следующей последовательности:

1-й этап — предварительная обработка исходных данных, удаление шумов и избыточной информации;

2-й этап — классификация исходного облака точек на точки, принадлежащие поверхности ландшафта, и точки, относящиеся к растительности;

3-й этап — моделирование поверхности ландшафта и лесной массы (деревьев и кустарника).

На точность лазерного сканирования влияет большое количество факторов: динамический характер съемки (сканирование осуществляется с воздушного средства передвижения), погрешности определения геодезических координат точек, ошибки пересчета в различные системы координат и высот и др. Наличие избыточной информации связано с тем, что современные сканеры позволяют получить очень высокую плотность точек. На рис. 1 представлен продольный профиль длиной 100 м, ширина полосы 1 м.

Существует достаточно большое количество алгоритмов, позволяющих проанализировать исходное облако точек лазерного сканирования и отфильтровать шумовые и ошибочные точки. Анализ инструментов, предоставленных для выполнения этих задач в различных программных продуктах компаний-лидеров по разработке программного обеспечения в данной отрасли, таких как Autodesk, Terrasolid, ESRI и др., показал,



■ Рис. 1. Продольный профиль, построенный по точкам лазерного сканирования

что необходим комплексный подход к реализации алгоритма, при этом применение имеющихся инструментов без доработки не позволит достичь желаемого результата.

Наложим на исходное облако точек VL воксельную сетку (voxel grid) с шагом $step_{vox}$. Воксел (volume element) — это трехмерное представление пиксела, куб с достаточно малой длиной ребра (размерность воксела). Таким образом, все трехмерное пространство в системе координат XYZ разбивается на множество кубов (вокселей) $Voxel_i(x_i, y_i, z_i)$:

$$\begin{aligned}x_{i+1} &= x_i + step_{vox}; \\y_{i+1} &= y_i + step_{vox}; \\z_{i+1} &= z_i + step_{vox},\end{aligned}$$

где $i = 0 \dots N_{vox}$, N_{vox} — общее количество вокселей в пространстве; $step_{vox}$ — размерность воксела.

Для каждого воксела вычислим количество точек P_{lazer_i} , содержащихся внутри данной области и на ее границе, удовлетворяющих логическому выражению

$$\forall i = 0 \dots N_{vox};$$

$$P_{lazer_i} = \sum_{j=0}^{j=N_L} \left(\begin{array}{l} (x_i \leq x_j \leq x_{i+1}) \text{ and} \\ (y_i \leq y_j \leq y_{i+1}) \text{ and} \\ (z_i \leq z_j \leq z_{i+1}) \end{array} \right).$$

Предположим, что если количество точек в вокселе P_{lazer_i} превышает некоторый заданный порог tr_{vox} и координата z_i находится в диапазоне высот полого леса от h_{min} до h_{max} , то данный воксел располагается в пространстве границы кроны деревьев. Если количество точек в вокселе P_{lazer_i} близко или равно нулю, то считается, что в данном вокселе нет никаких объектов моделируемой сцены. Если количество точек в вокселе P_{lazer_i} превышает некоторое заданное значение порога tr_{vox} и координата z_i находится ниже полого леса h_{min} , то данный воксел относится к поверхности Земли или к стволу дерева. Определим правила классификации вокселей:

$$\begin{aligned}\text{if}((P_{lazer_i} \geq tr_{vox}) \text{ and } (h_{min} \leq z_i \leq h_{max})) \\ \text{then } Voxel_i \in T; \\ \text{if}((P_{lazer_i} \geq tr_{vox}) \text{ and } (z_i \leq h_{min})) \\ \text{then } Voxel_i \in L; \\ \text{if}(P_{lazer_i} \approx 0) \text{ then } Voxel_i \in E.\end{aligned}$$

Определим диапазон высоты полого леса h_{min} и h_{max} . Верхний порог h_{max} является глобальным максимумом координаты z для всего множества точек VL :

$$h_{max} = \max_z VL.$$

Для определения минимального значения высоты полого леса необходимо иметь информацию о типе ландшафта (равнина, горы, холмы) для данного региона. Увеличим размерность воксела многократно, вычислим параметр R_i , определяющий перепад высот и, соответственно, тип местности:

$$R_i = 1 - \frac{RSS_i}{TSS_i}.$$

Здесь RSS_i — остаточная сумма квадратов разностей:

$$RSS_i = \sum_{j=1}^n (z_j - \hat{z}_j)^2,$$

и TSS_i — общая сумма квадратов разностей:

$$TSS_i = \sum_{j=1}^n (z_j - \bar{z}_j)^2,$$

где n — количество точек в вокселе; \hat{z}_j — среднее значение координаты z в вокселе; \bar{z}_j — минимальное значение, которое принимает координата z в вокселе.

Параметр R_i принимает значения от 0 до 1, при этом чем ближе значение к единице, тем ровнее считается ландшафт. Для всех регионов, где R_i больше либо равно 0,75, точки с минимальным значением z классифицируются как точки Земли. Минимальные значения z , не классифицированные как точки Земли, определяют минимальное значение порога h_{min} как среднеквадратичное значение координат z .

Прежде чем перейти к третьему этапу (моделирование ландшафтной сцены), необходимо собрать дополнительную информацию о моделируемых объектах-деревьях по данным аэрофотосъемки региона.

Таким образом, алгоритм совмещения данных лазерного сканирования и аэрофотоснимков в задаче моделирования растительности включает следующие шаги:

1. Определение породы дерева по аэрофотоснимку. В зависимости от породы дерева выбирается тип ветвления для работы алгоритма L -систем (моноподиальное, симподиальное или тернарное).

2. Локализация формы кроны деревьев. Поиск корневой точки (точки начала ствола дерева) из исходного облака данных лазерного сканирования — стартовой точки работы алгоритма L -систем (5–6 итераций) и определение формы кроны дерева [10].

3. Окончательное моделирование кроны дерева с использованием алгоритма Space Colonization [11].

Классификация деревьев по данным аэрофотосъемки

Использование только одного типа данных — точек лазерного сканирования — не позволяет определить породу дерева по предварительно сегментированному облаку точек. Данные лазерного сканирования можно использовать только для определения формы кроны дерева. Для определения класса объекта (береза, сосна, пихта, ель, кедр, осина и пр.) необходимо осуществить аэрофотосъемку региона.

Отметим, что деревья на аэрофотоснимках древостоя относятся к малым и слабоконтрастным изображениям, границы контуров объектов представляют собой не контрастные линии, а размытые переходные полосы. В каждом конкретном случае возможности дешифрования аэрофотоснимков определяются природой сканируемых объектов, тем не менее существует относительно стабильная группа дешифровочных признаков, позволяющих причислить объекты к тому или иному классу (хвойному лесу, лиственному лесу, сельскохозяйственному полю, реке, озеру и т. п.). К прямым признакам относят размеры, форму, тени, цвет и текстуру изображения объектов на аэрофотоснимке. Критерием отнесения дерева к тому или иному классу в нашем случае является цветовая составляющая объекта на аэрофотоснимке — яркостная компонента изображения Y в цветовом пространстве YUV :

$$Y = 0,299R + 0,587G + 0,114B,$$

где R, G, B — интенсивности цветов красного, зеленого и синего.

Цвета изображений топографических объектов на аэрофотоснимках, а также соответствующая им яркостная характеристика представлены в табл. 1. Яркостная характеристика определяется эвристическим способом, путем анализа нескольких фрагментов аэрофотоснимков.

В табл. 1 приведены типы лесов, которые встречаются в Сибирском федеральном округе. Также стоит отметить, что при сканировании поздней весной или в начале лета (в связи с неполным развитием крон у лиственных пород), а так-

же поздним летом или в начале осени (когда лиственные деревья фиксируются на аэрофотоснимках более светлым цветом, чем темнохвойные) задача кластеризации решается эффективнее.

Таким образом, для каждого участка аэрофотоснимка вычисляется яркостная компонента Y , на основании которой происходит кластеризация.

Локализация крон деревьев

Следующим этапом является локализация крон деревьев. Сегментацию деревьев предваряет этап нормализации данных. Нормализация данных заключается в вычитании из каждой точки облака значения высоты Земли в данной координате, для чего необходимо знать значение высоты Земли в каждой точке. Алгоритм включает следующие шаги:

1. Используя облако точек, классифицированных как поверхность Земли (множество L), строим двумерный массив значений высот в каждой точке.

2. Проверяем массив высот на отсутствие значений высоты в отдельных ячейках. Если таковые находятся, используем линейную интерполяцию для заполнения пустоты.

3. Обрабатываем каждую точку сегментируемого облака точек растительности (множество T). Вычитаем из значения высоты обрабатываемой точки значение высоты из массива высот.

Далее, имея нормализованное облако точек, можно приступать к сегментации. Сегментация всего множества T на подмножества T_1, T_2, T_3, \dots состоит из следующих шагов:

1. Сортируются в массиве облака точек значения высот точек — от большего к меньшему.

2. Берется первая точка массива и считается верхушкой дерева.

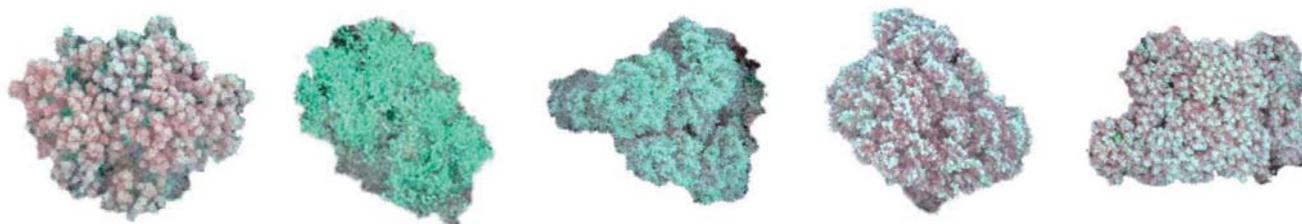
3. Обрабатывается каждая точка. Выявляется ее принадлежность к данному дереву.

4. После обработки всех точек из массива облака точек удаляются все точки, принадлежащие данному дереву.

5. Если точек в облаке больше нет, обработка завершается, иначе осуществляется переход к шагу 2.

■ Таблица 1. Перечень цветов изображения объектов на аэрофотоснимках

Объект	Черно-белые снимки	Цветные снимки	Спектрональные снимки	Диапазон яркостной компоненты Y
Лиственные леса	Светло-серый	Светло-зеленый	Светло-зеленый	167–171
Березовые леса	Светло-серый	Зеленый	Зеленовато-желтый	184–193
Хвойные леса	Серый	Зеленый	Зеленый	72–85
Лиственные леса	Серый	Зеленый	Красновато-коричневый	179–187
Лиственные кустарники	Серый	Зеленый	Желтовато-коричневый	115–127



■ Рис. 2. Результаты сегментирования кроны деревьев

Таким образом получается сегментированное облако точек. Принадлежность точки к тому или иному дереву выявляется на основе следующих классификационных правил.

1. Учитывается относительное расстояние между кронами деревьев, форма дерева для простоты вычислений представляется в виде конуса. Данное предположение работает в разреженных участках леса, где расстояние между основаниями конусов (деревьев) будет меньше, чем расстояние между вершинами конуса.

2. При перекрытии кроны деревьев точки классифицируются последовательно сверху вниз. Подбирается фиксированный порог — примерный радиус кроны дерева, и в зависимости от этого порога точка относится к тому или иному объекту.

Результаты сегментирования аэрофотоснимка представлены на рис. 2.

Таким образом, деревья сегментируются на основе порогового расстояния (фиксированный или адаптивный порог) и правила минимального расстояния.

Модель роста дерева

Наибольшее распространение получило описание модели дерева в виде простейших геометрических примитивов, таких как сфера или конус [12].

Существуют два основных метода описания процесса роста дерева: методы на основе различных грамматик (в том числе и L -систем) и метод Монте Карло по схеме марковских цепей.

Будем считать, что дерево представляет собой некий фрактал, структурной единицей которого является побег. Для описания фрактальных структур используются грамматики L -систем. В общем виде L -системы представляют собой грамматику

$$G = \langle V, T, S, \omega, P \rangle,$$

где V — набор переменных; T — набор команд; S — набор формальных параметров; ω — набор аксиом; P — множество продукций — правил ветвления. Изначально алгоритм использовался в 2D-пространстве. Для визуализации

используются принципы черепаший графики, когда для вычисления положения черепахи в 3D-пространстве определяются векторы H , L , U вдоль направления осей в системе координат XYZ . Изменение направления черепахи в пространстве вычисляется с помощью матриц поворота $R_U(\alpha)$, $R_L(\alpha)$ и $R_H(\alpha)$, где α — угол поворота:

$$R_U(\alpha) = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$R_L(\alpha) = \begin{bmatrix} \cos \alpha & 0 & -\sin \alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \alpha & 0 & \cos \alpha \end{bmatrix};$$

$$R_H(\alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix}.$$

Список команд представлен в табл. 2.

В зависимости от типа ветвления: моноподиальное, симподиальное и тернарное — используются различные правила ветвления, разработанные Линденмайером [13]. Приведем усовершенствованное описание модели роста деревьев разных пород. Для каждого типа ветвления были подобраны различные углы ветвления во всевозможных направлениях, а также коэффициенты пропорциональности дочерних и материнской ветвей (табл. 3).

Предполагается, что на каждой последующей итерации ($i + 1$) длина побега уменьшается с удалением от вершины на i -й итерации. Зависимость длины побега от расстояния до вершины описывается следующим образом:

$$L_i = L_{apex_i} - \frac{\alpha_i}{L_{apex_i}} r,$$

где L_i — длина побега; L_{apex_i} — длина побега на вершине оси; α_i — скорость уменьшения длины побега; r — расстояние от вершины оси ($i - 1$) итерации до основания оси i -й итерации.

■ Таблица 2. Список команд ветвления

№	Символ	Описание команды
1	$F(a), A(a) B(a), C(a) D(a), G(a)$	Продвинуться в заданном направлении и нарисовать линию ($a > 0$)
2	&	Двигаться вверх, используя матрицу поворота $R_L(\alpha)$
3	^	Двигаться вниз, используя матрицу поворота $R_L(-\alpha)$
4	\	Повернуть влево, используя матрицу поворота $R_H(\alpha)$
5	/	Повернуть вправо, используя матрицу поворота $R_H(-\alpha)$
6	*	Подняться вверх, используя матрицу поворота $R_L(\beta)$
7	%	Опуститься вниз, используя матрицу поворота $R_L(-\beta)$
8	~	Повернуть влево, используя матрицу поворота $R_H(\beta)$
9	?	Повернуть вправо, используя матрицу поворота $R_H(-\beta)$
10	\$	Подняться вверх, используя матрицу поворота $R_L(\gamma)$
11	@	Опуститься вниз, используя матрицу поворота $R_L(-\gamma)$
12	!	Повернуть влево, используя матрицу поворота $R_H(\gamma)$
13	#	Повернуть вправо, используя матрицу поворота $R_H(-\gamma)$
14	[Запомнить текущую позицию
15]	Вернуться к запомненной позиции

■ Таблица 3. Разработанные правила ветвления

№	Правила ветвления	Визуализация модели дерева
1	$\omega: F(a)$ $P: F(a) \rightarrow F(a)[F(0,5a)][^F(0,5a)][\& F(0,5a)][/ F(0,5a)]$ $[\ \ F(0,5a)]$ $\&\ \ / = 50^\circ$ $n = 3$	
2	$\omega: F(a)$ $P: F(a) \rightarrow F(a)[F(0,5a)][^F(0,5a)][\& F(0,5a)][/ F(0,5a)]$ $[\ \ F(0,5a)]$ $\&\ \ / = 30^\circ$ $n = 3$	
3	$\omega: F(a)$ $P: F(a) \rightarrow F(a) [F(0,5a)][^F(0,33a)][\& F(0,33a)]$ $[/ F(0,33a)][\ \ F(0,33a)]$ $\&\ \ / = 70^\circ$ $n = 3$	
4	$\omega: X$ $P: F(a) \rightarrow B(0,5a)[^F(0,5a)][\& F(0,5a)][/ F(0,5a)]$ $[\ \ F(0,5a)]$ $X \rightarrow A(0,5a)[^F(0,5a)][\& F(0,5a)][/ F(0,5a)][\ \ F(0,5a)]$ $\&\ \ / = 30^\circ$ $n = 3$	

№	Правила ветвления	Визуализация модели дерева
5	$\omega: X$ $P: F(a) \rightarrow B(0,5a)[^{\wedge}F(0,5a)][\&F(0,5a)][/F(0,5a)][\setminus F(0,5a)]$ $S \rightarrow B(0,5a)[^{\wedge}F(0,33a)][\&F(0,33a)][/F(0,33a)]$ $[\setminus F(0,33a)]$ $X \rightarrow A(a)[^{\wedge}S][\&S][/F(a)][\setminus F(a)]$ $\&^{\wedge} \setminus / = 30^{\circ}$ $n = 3$	
6	$\omega: X$ $P: F(a) \rightarrow B(0,5a)[^{\wedge}F(0,5a)][\&F(0,5a)][/F(0,5a)]$ $[\setminus F(0,5a)]$ $S \rightarrow C(0,33a)[^{\wedge}F(0,5a)][\&F(0,5a)][/F(0,5a)][\setminus F(0,5a)]$ $X \rightarrow A(a)[^{\wedge}S][\&S][/F(a)][\setminus F(a)]$ $\&^{\wedge} \setminus / = 30^{\circ}$ $n = 3$	
7	$\omega: [F(a)][B(a)]$ $P: F(a) \rightarrow F(a)[^{\wedge}F(0,5a)][\&F(0,5a)][/F(0,5a)][\setminus F(0,5a)]$ $B(a) \rightarrow B(a)[^{\wedge}F(0,5a)][\&F(0,5a)][/F(0,5a)][\setminus F(0,5a)]$ $\&^{\wedge} \setminus / = 30^{\circ}$ $n = 3$	
8	$\omega: [F(a)][B(a)][C(a)][D(a)]$ $P: F(a) \rightarrow F(a)[^{\wedge}F(0,5a)][\&F(0,5a)][/F(0,5a)][\setminus F(0,5a)]$ $B(a) \rightarrow B(a)[^{\wedge}F(0,5a)][\&F(0,5a)][/F(0,5a)][\setminus F(0,5a)]$ $C(a) \rightarrow C(a)[^{\wedge}F(0,5a)][\&F(0,5a)][/F(0,5a)][\setminus F(0,5a)]$ $D(a) \rightarrow D(a)[^{\wedge}F(0,5a)][\&F(0,5a)][/F(0,5a)][\setminus F(0,5a)]$ $\&^{\wedge} \setminus / = 30^{\circ}$ $n = 3$	
9	$\omega: F(a)$ $P: F(a) \rightarrow F(a)[^{\wedge}G(0,5a)][\&G(0,5a)][/G(0,5a)][\setminus G(0,5a)]$ $G(0,5a) \rightarrow G(0,5a)[^*B(0,25a)][\%B(0,25a)][\sim B(0,25a)]$ $[?B(0,25a)]$ $B(0,25a) \rightarrow B(0,25a)[\%S(0,125a)][\@S(0,125a)]$ $[\!S(0,125a)][\#S(0,125a)]$ $\&^{\wedge} \setminus / * \% \sim ? = 60^{\circ}$ $\$ @ ! \# = 20^{\circ}$ $n = 3$	
10	$\omega: B(2a)[\@F(a)][\$F(a)][!F(a)][\#F(a)]$ $P: F(a) \rightarrow F(a)[^{\wedge}F(0,5a)][\&F(0,5a)][/F(0,5a)][\setminus F(0,5a)]$ $\&^{\wedge} \setminus / @ \$ = 30^{\circ}$ $! \# = 50^{\circ}$ $n = 2$	
11	$\omega: F(a)$ $P: F(a) \rightarrow F(a)[^{\wedge}F(0,33a)][\&F(0,33a)][/F(0,33a)]$ $[\setminus F(0,33a)]$ $\&^{\wedge} \setminus / = 120^{\circ}$ $n = 2$	
12	$\omega: F(a)$ $P: F(a) \rightarrow F(a)[^{\wedge}F(0,5a)][\&F(0,5a)][/F(0,5a)][\setminus F(0,5a)]$ $\&^{\wedge} \setminus / = 120^{\circ}$ $n = 2$	

№	Правила ветвления	Визуализация модели дерева
13	$\omega: F(a)$ $P: F(a) \rightarrow F(a)[\wedge F(0,5a)][\&F(0,5a)][/F(0,5a)][\setminus F(0,5a)]$ $\&\wedge \setminus / = 30^\circ$ $n = 3$	

■ Таблица 4. Характеристики моделирования для различных правил ветвления

№	Поверхности	Вершины	Ребра	Итерации
1	110	64	172	3
2	212	125	335	3
3	244	125	367	3
4	98	64	160	3
5	110	64	172	3
6	102	64	164	3
7	222	128	348	3
8	474	256	728	3
9	106	64	168	3
10	102	64	164	2
11	36	25	59	2
12	22	16	36	2
13	98	64	160	3

Таким образом, имитировать воздействие внешних факторов на рост дерева можно путем изменения параметра α_i , причем значение этого параметра может изменяться не только на разных итерациях (периодах роста дерева), но и варьироваться по всему объему кроны, обеспечивая бесконечное множество форм моделируемых деревьев.

Для каждого правила ветвления из табл. 3 приведены результаты моделирования (табл. 4).

Однако для моделирования кроны дерева заданной асимметричной формы разработанные правила ветвления на основе L -систем не подходят (они хороши для разработки ветвления внутри кроны дерева — в пространстве, где достаточно малое количество регистрируемых лазером точек); для визуализации кроны дерева необходимо в дальнейшем использовать алгоритм Space Colonization.

Моделирование кроны дерева с использованием алгоритма Space Colonization

Данный алгоритм изначально был предложен Рунионом [11] для предсказания движения человека в толпе и позже стал использоваться для визуализации различных ветвящихся структур.

Основная идея также заключается в итеративном добавлении новых элементов (ветвей) к существующей геометрической структуре объекта (дерева), сформированного на предыдущих шагах. Данный алгоритм является адаптивным, т. е. процесс роста зависит от следующих параметров: близлежащего присутствия объектов окружающего мира, соседства с другими деревьями.

Пусть имеется некоторая «корневая» точка v , из этой точки может выходить несколько ветвей, т. е. в окрестности данной точки имеется множество точек $S(v)$, находящихся на расстоянии меньше, чем d_i — параметр, задаваемый пользователем (параметр управления). Если множество $S(v)$ непустое, то новая точка v' присоединяется к общей структуре дерева путем построения сегмента (v, v') . Причем новая точка v' находится на расстоянии D от исходной точки v в направлении средненормированного вектора по отношению ко всем источникам $S \in S(v)$.

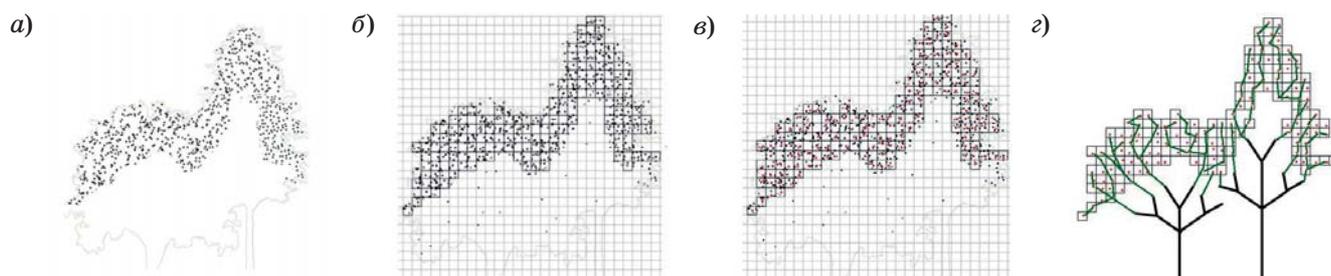
Данный алгоритм использовался для детальной прорисовки кроны дерева. На рис. 3, а показана визуализация исходного облака точек (фрагмент); на рис. 3, б отображено разбиение пространства облака точек на воксели; на рис. 3, в для каждого вокселя находим центр масс. Полученное облако точек является исходным облаком для работы алгоритма Space Colonization; на рис. 3, г представлена работа правил ветвления на основе L -систем (около трех итераций). Конечные позиции работы правил ветвления L -систем являются стартовыми точками работы алгоритма Space Colonization. Каждая последующая ветвь вычисляется таким образом:

$$v' = v + D\tilde{n},$$

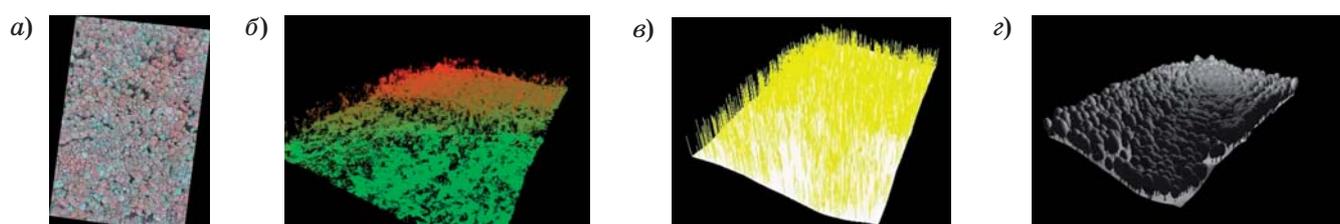
где D — расстояние между точками v и v' , $v(x, y, z)$ — точка начала новой ветви, $v'(x', y', z')$ — конечная точка новой ветви; \tilde{n} — средненормированный вектор направления роста ветви:

$$\tilde{n} = \frac{\bar{n}}{\|\bar{n}\|}; \quad \bar{n} = \sum_{S \in S(v)} \frac{s-v}{\|s-v\|}.$$

Данный процесс заканчивается при прохождении всех точек кроны дерева или при выполнении заданного пользователем количества ите-



■ **Рис. 3.** Алгоритм процесса роста дерева: *a* — исходное облако точек лазерного сканирования; *b* — разбиение на множество вокселей; *в* — нахождение центра масс в каждом вокселе; *г* — работа алгоритма Space Colonization



■ **Рис. 4.** Полученные результаты: *a* — аэрофотоснимок моделируемой территории; *b* — исходное облако точек; *в* — локализация кроны деревьев; *г* — восстановление трехмерной модели сцены

раций. Некоторые узловые точки удаляются. Это называется прореживанием, иными словами, при построении нового сегмента происходит проверка: все точки, находящиеся на расстоянии dk (dk — kill distance, входной параметр) от точки v' , удаляются.

Результатом исследовательской работы, описанной в статье, является трехмерная модель участка леса, представленная на рис. 4. На рис. 4, *a* приведены данные аэрофотосъемки моделируемого региона; на рис. 4, *b* представлена визуализация данных лазерного сканирования — исходного облака точек трехмерных данных; на рис. 4, *в* показаны результаты процесса локализации кроны деревьев, определения радиуса кроны дерева и на рис. 4, *г* представлена трехмерная модель ландшафтной сцены с использованием графических примитивов в качестве представления кроны дерева.

Заключение

В работе приведены правила классификации исходного облака точек данных лазерного сканирования на различные группы: точки растительности, точки поверхности Земли и точки с избыточной информативностью, а также шумы и ошибочные измерения. Экспертная оценка качества построенных моделей поверхности и растительности была выведена путем визуального сравнения и оценки множества моделей, полученных в результате работы алгоритмов с различными входными параметрами. В результате можно сделать вывод, что построение модели зависит от настройки параметров алгоритмов для конкретного облака точек. Однако зная дополнительную информацию о территории, можно улучшить результаты моделирования лесной растительности.

Литература

1. Boudon F., et al. L-Py: an L-system Simulation Framework for Modeling Plant Development Based on a Dynamic Language // *Frontiers in Plant Science*. 2012. Vol. 3. N 76. doi:10.3389/fpls.2012.00076
2. Palubicki W., et al. Self-organizing Tree Models for Image Synthesis // *ACM TOG*. 2009. Vol. 28. N 3. P. 1–10.
3. Longay S., Runions A., Boudon F., Prusinkiewicz P. TreeSketch: Interactive Procedural Modeling of Trees on a Tablet // *The Proc. of the Eurographics Symp. on Sketch-based Interfaces and Modeling*. 2012. P. 107–120.
4. Guenard J., Morin G., Boudon F., Charvillat V. Realistic Plant Modeling from Images Based on Analysis-by-Synthesis // *Eighth Intern. Conf. on Mathematical Methods for Curves and Surfaces*, Oslo, Norway, 2012. P. 213–229.
5. Quan L., et al. Image-based Plant Modeling // *ACM TOG*. 2007. Vol. 25. N 3. P. 599–604.
6. Tan P., et al. Image-based Tree Modeling // *ACM TOG*. 2007. Vol. 26. N 3. P. 1–7.

7. Lintunen A., Sievänen R., Kaitaniemi P., Perttunen J. Models of 3D Crown Structure for Scots Pine (*Pinussylvestris*) and Silver Birch (*Betula Pendula*) Grown in Mixed Forest // *Canadian Journal of Forest Research*. 2011. Vol. 41. N 9. P. 1779–1794.
8. Seidl R., Rammer W., Scheller R. M., Spies T. A. An Individual-based Process Model to Simulate Landscape-scale Forest Ecosystem Dynamics // *Ecological Modelling*. 2012. Vol. 231. P. 87–100.
9. Smelik R. M., Tutenel T., Biddara R., Benes B. A Survey on Procedural Modeling for Virtual Worlds // *Proc. of the Workshop on 3D Advanced Media in Gaming and Simulation*. 2014. P. 25–34.
10. Favorskaya M., Tkacheva A., Danilin I. M., Medvedev E. M. Fusion of Airborne LiDAR and Digital Photography Data for Tree Crowns Segmentation and Measurement // *Intelligent Interactive Multimedia Systems and Services (SIST)* / E. Damiani, R. J. Howlett, L. C. Jain, L. Gallo, G. De Pietro (Ed.). Springer International Publishing Switzerland, 2015. Vol. 40. P. 191–201.
11. Runions A., Lane B., Prusinkiewicz P. Modeling Tree with a Space Colonization Algorithm // *Eurographics Workshop on Natural Phenomena*. 2007. P. 63–70.
12. Медведев Е. М., Данилин И. М., Мельников С. Р. Лазерная локация Земли и леса: учеб. пособие. 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Геолидар; Геокосмос; Красноярск: Институт леса им. В. Н. Сукачёва СО РАН, 2007. — 230 с.
13. Prusinkiewicz P., Lindenmayer A. *The Algorithmic Beauty of Plants*. — N. Y.: Springer-Verlag, 1990. — 228 p.

UDC 004.925

doi:10.15217/issn1684-8853.2015.6.40

Modeling of 3D Forest Scenes by Laser Scanning and Air Photo DataTkacheva A. A.^a, Post-Graduate Student, tkacheva@sibsau.ruFavorskaya M. N.^a, Dr. Sc., Tech., Professor, favorskaya@sibsau.ru^aSiberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev, 31, Krasnoyarsky Rabochy St., 660037, Krasnoyarsk, Russian Federation

Purpose: Visualization of vegetation in three-dimensional landscape scenes is not a trivial task because different tree species have different branch structure. General purpose packages do not let you develop vegetation models unless you have special skills. Specialized packages like GIS use generalized graphic primitives to describe the shape of a tree crown. The problem is to develop branching rules for both coniferous and broad-leaved species of trees. **Results:** Simulation of 3D-scenes of forest areas is described, based on airborne laser scanning data and aerial photographs providing the information about the shape of a tree crown, height of the forest canopy and type of the terrain using the classification rules for the data of the laser scanning. These rules are based on the decomposition of the original cloud of points into 3D-cubes called voxels. Branching rules have been developed for different tree species on the base of L-systems used to draw the main skeleton of a tree model. Space Colonization algorithm was used for the detailed modelling of the tree crown. **Practical relevance:** The obtained laser scanning data classification rules let you design high-precision models of natural forest landscape scenes for data visualization.

Keywords — 3D Modelling, Laser Scanning, Air Photos, Data Fusion, Tree Modelling, Forest Modelling.

References

1. Boudon F., Pradal C., Cokelaer T., Prusinkiewicz P., Godin C. L-Py: an L-System Simulation Framework for Modeling Plant Development Based on a Dynamic Language. *Frontiers in Plant Science*, 2012, vol. 3, no. 76. doi:10.3389/fpls.2012.00076
2. Palubicki W., Horel K., Longay S., Runions A., Lane B., Mech R., Prusinkiewicz P. Self-organizing Tree Models for Image Synthesis. *ACM TOG*, 2009, vol. 28, no. 3, pp. 1–10.
3. Longay S., Runions A., Boudon F., Prusinkiewicz P. TreeSketch: Interactive Procedural Modeling of Trees on a Tablet. *Proc. of the Eurographics Symp. on Sketch-based Interfaces and Modeling*, 2012, pp. 107–120.
4. Guenard J., Morin G., Boudon F., Charvillat V. Realistic Plant Modeling from Images Based on Analysis-by-Synthesis. *Eighth Intern. Conf. on Mathematical Methods for Curves and Surfaces*, Oslo, Norway, 2012, pp. 213–229.
5. Quan L., Tan P., Zeng G., Yuan L., Wang J., Kang S. B. Image-based Plant Modeling. *ACM TOG*, 2007, vol. 25, no. 3, pp. 599–604.
6. Tan P., Zeng G., Wang J., Kang S. B., Quan L. Image-based Tree Modeling. *ACM TOG*, 2007, vol. 26, no. 3, pp. 1–7.
7. Lintunen A., Sievänen R., Kaitaniemi P., Perttunen J. Models of 3D Crown Structure for Scots Pine (*Pinussylvestris*) and Silver Birch (*Betula Pendula*) Grown in Mixed Forest. *Canadian Journal of Forest Research*, 2011, vol. 41, no. 9, pp. 1779–1794.
8. Seidl R., Rammer W., Scheller R. M., Spies T. A. An Individual-based Process Model to Simulate Landscape-scale Forest Ecosystem Dynamics. *Ecological Modelling*, 2012, vol. 231, pp. 87–100.
9. Smelik R. M., Tutenel T., Biddara R., Benes B. A Survey on Procedural Modeling for Virtual Worlds. *Proc. of the Workshop on 3D Advanced Media in Gaming and Simulation*, 2014, pp. 25–34.
10. Favorskaya M., Tkacheva A., Danilin I. M., Medvedev E. M. Fusion of Airborne LiDAR and Digital Photography Data for Tree Crowns Segmentation and Measurement. *Intelligent Interactive Multimedia Systems and Services (SIST)*, E. Damiani, R. J. Howlett, L. C. Jain, L. Gallo, G. De Pietro (Ed.), Springer International Publishing Switzerland, 2015, vol. 40, pp. 191–201.
11. Runions A., Lane B., Prusinkiewicz P. Modeling Tree with a Space Colonization Algorithm. *Eurographics Workshop on Natural Phenomena*, 2007, pp. 63–70.
12. Medvedev E. M., Danilin I. M., Mel'nikov S. R. *Lazernaia lokatsiia Zemli i lesa* [Laser Location of Earth and Forest]. Moscow, Geolidar Publ., Geokosmos Publ., Krasnoyarsk: Institut lesa im. V. M. Sukacheva SO RAN Publ., 2007. 230 p. (In Russian).
13. Prusinkiewicz P., Lindenmayer A. *The Algorithmic Beauty of Plants*. N. Y., Springer-Verlag, 1990. 228 p.

МОДЕЛИРОВАНИЕ КИНЕМАТИКИ ШАГАЮЩЕГО РОБОТА

В. В. Михайлов^а, доктор техн. наук, профессор

Т. Н. Соловьева^б, канд. техн. наук, доцент

В. П. Попов^б, канд. техн. наук, доцент

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

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

Цель: для конструирования системы управления шагающей машиной необходимо наличие кинематической и динамической моделей этой машины. Целью исследования является разработка кинематической модели для действующего макета шестиногого шагающего робота, позволяющей получить визуальное представление о его перемещении в пространстве при создании алгоритмов управления. **Результаты:** найдено математическое описание кинематической модели шестиногого шагающего робота в виде систем уравнений для определения положения узлов робота при заданных углах разворота звеньев конечностей. Получена система разностных уравнений, позволяющая провести моделирование движений робота при управлении по вектору скорости. На основании разработанной модели выполнена визуализация различных типов перемещения робота в пакете MatLab. Изменение углов расположения конечностей робота осуществляется с помощью гидроприводов, в связи с этим получены уравнения, определяющие связь величины выдвигания штоков гидроприводов и углов расположения конечностей. Для оценки возможностей перемещения робота построена область достижимости ступни и найдены аналитические границы этой области. **Практическая значимость:** разработанная модель может быть использована как основа построения динамической модели при разработке и апробации алгоритмов управления движением машины, а также для управления макетом машины в режиме следящего привода.

Ключевые слова — шестиногий робот, шагающая машина, кинематическая модель, область достижимости, управление по вектору скорости.

Введение

Шагающие устройства обладают преимуществами перед любыми типами движителей при перемещении в условиях бездорожья, сложного рельефа и при преодолении препятствий. Конструктивные особенности таких устройств обеспечивают более простое (по сравнению с колесными или гусеничными машинами) решение задач герметизации и термостатирования в условиях глубокого вакуума, высоких давлений и больших градиентов температуры. Анализ характеристик шагающих движителей в сравнении с колесными и гусеничными приведен в работе [1].

Разработка математических моделей и действующих макетов шагающих роботов началась более 50 лет назад. В этих исследованиях принимали активное участие Д. Е. Охочимский, А. К. Платонов, В. Б. Ларин и другие советские и российские ученые. Их работы посвящены задачам управления шагающим аппаратом, вопросам статической и динамической устойчивости и классификации различных походок [2–4]. За рубежом одна из первых работ в области шагающих роботов принадлежит сербскому академику Миомиру Вукобратовичу [5]. Весомый вклад в развитие шагающих машин внесли и сотрудники ГУАП [1, 6, 7]. Однако условия для создания реальных конкурентоспособных машин такого рода сложились лишь сейчас в связи с потребностями космической отрасли, необходимостью

проведения работ на морском дне, мониторинга энергосетей и нефтегазовых трубопроводов, а также в результате развития информационных и машиностроительных технологий [8, 9].

Традиционно задачи водителей колесного или гусеничного транспорта состояли в выборе и задании направления и скорости движения в соответствии с целями движения и дорожной обстановкой. Предполагается, что оператор шагающего робота должен выполнять аналогичные функции. Управлять движением звеньев конечностей для перемещения машины в заданном направлении, координировать движение ног во время рабочего перемещения и свободного переноса, выбирать тип походки и величину клиренса с учетом устойчивости машины должна бортовая компьютерная система. На ручное управление оператор может переходить в сложных условиях при преодолении препятствий, но и в этом случае его роль должна ограничиваться выбором мест постановки ноги и ее переносом, а также заданием локального направления перемещения машины на очередном шаге с учетом устойчивости. Для инструментальной поддержки действий оператора при этом может использоваться микроманипулятор — имитатор конечности, а для контроля устойчивости — представленное на дисплее расположение центра тяжести машины относительно зоны устойчивости.

Таким образом, одной из основных задач проектирования шагающего робота является раз-

работка системы управления. Для построения и отладки алгоритмов управления необходимо создать адекватную модель робота. На первом этапе строится кинематическая модель, в которой не учитываются вес звеньев робота и динамические связи между ними. Здесь робот рассматривается как совокупность материальных точек (узлов), характеризующихся некоторыми координатами и скоростями. Такая модель удобна для разработки различных вариантов перемещения конечностей робота и его платформы. Кинематическая модель позволяет получить уравнения движения отдельных узлов робота в каждом из вариантов перемещения и оценить его статическую устойчивость. На втором этапе разработки системы управления необходимо построить динамическую модель, учитывающую массу отдельных звеньев робота и динамические связи между звеньями. Основная задача системы управления — обеспечить движение звеньев по полученным на первом этапе уравнениям движения за счет подачи соответствующих управляющих сигналов с учетом динамической устойчивости робота.

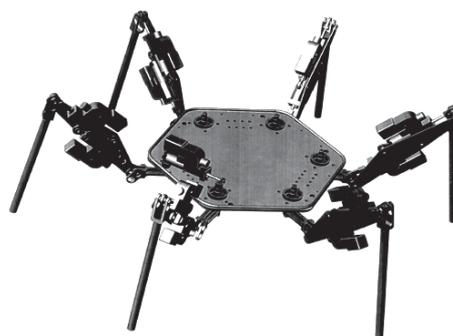
Данная статья посвящена разработке кинематической модели шестиногого робота. В частности, для достижения этой цели решаются задачи:

- выбора совокупности систем координат, связанных с узлами машины;
- разработки кинематической модели конечности робота;
- разработки кинематической модели гидропривода;
- построения области достижимости для отдельной конечности робота;
- построения векторов скоростей стоп ног при прямолинейном движении машины и ее вращения вокруг осей координат;
- моделирования и визуализации различных вариантов движения машины.

Разработка кинематической модели робота

Конкретным объектом моделирования является действующий макет шагающей машины (рис. 1), разработанный сотрудниками ГУАП и ЗАО «Арсенал-7» [1].

Платформа (корпус машины) представляет собой правильный шестиугольник, в вершинах которого расположены трехзвенные конечности (ноги машины). В отличие от живых организмов с шаровым бедренным суставом, шарниры бедренного сустава машины имеют одну степень свободы. Шарниры разнесены в пространстве, и между ними добавлено промежуточное звено. В точке крепления ноги к платформе происходит вращение вокруг вертикальной оси, а в точке крепления бедра к промежуточному звену — вра-



■ Рис. 1. Макет шагающей машины

щение вокруг горизонтальной оси. Коленный сустав имеет одну степень свободы — вращение вокруг горизонтальной оси. Для перемещения звеньев используются гидроприводы.

Возможны различные подходы к построению кинематической модели шагающей машины.

Например, в работе [1] представлено описание геометрической конструкции платформы шестиногого робота и кинематической структуры конечностей. Положение платформы робота в пространстве задается следующими уравнениями [1]:

$$\begin{aligned} (x_{ai} - x_{aj})^2 + (y_{ai} - y_{aj})^2 + (z_{ai} - z_{aj})^2 &= R^2; \\ (x_{ai} - x_{a0})^2 + (y_{ai} - y_{a0})^2 + (z_{ai} - z_{a0})^2 &= R^2; \\ Ax_{ai} + By_{ai} + Cz_{ai} &= 0, \end{aligned}$$

где $i = \overline{1, 6}$, $j = (i + 1) \bmod 6$; x_{ai} , y_{ai} , z_{ai} — координаты точек закрепления ног; x_{a0} , y_{a0} , z_{a0} — координаты центра платформы; A , B , C — параметры плоскости платформы; R — расстояние между точками крепления ног.

Переменными здесь являются координаты семи точек (центра платформы и точек закрепления ног) и три параметра плоскости платформы. Таким образом, общее количество переменных равно 24, а количество уравнений — 18. Наличие шести свободных переменных позволяет задать угловое положение плоскости платформы и положение ее центра (или любой другой точки).

Положение стоп ног машины определяется уравнениями

$$\begin{aligned} x_{ci} &= x_{ai} + (L_1 \sin \beta_1 + L_2 \sin(\beta_2 - \beta_1)) \cos \left(\beta_3 + \frac{(i-1)\pi}{3} \right); \\ y_{ci} &= y_{ai} + (L_1 \sin \beta_1 + L_2 \sin(\beta_2 - \beta_1)) \sin \left(\beta_3 + \frac{(i-1)\pi}{3} \right); \\ z_{ci} &= L_1 \cos \beta_1 - L_2 \sin(\beta_2 - \beta_1), \end{aligned}$$

где $i = \overline{1, 6}$; x_{ci} , y_{ci} , z_{ci} — координаты стоп ног; L_1 , L_2 — длины бедра и голени; β_1 — угол отклонения бедра от вертикальной оси; β_2 — угол поворота голени относительно бедра; β_3 — угол разворота бедра вокруг вертикальной оси.

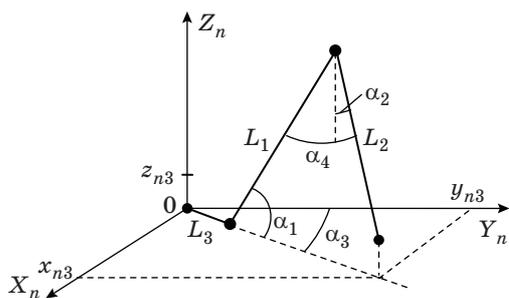
В уравнениях ног дополнительными переменными являются углы разворота звеньев и координаты стоп. Общее количество дополнительных переменных равно 36. Таким образом, в целом модель машины описывается системой из 36 уравнений с 60 переменными. Количество свободных переменных равно 24, из них 6 переменных необходимы для задания положения платформы. Оставшиеся 18 переменных позволяют задать расположение стоп ног в произвольных точках области, границы которой определяются конструктивными особенностями звеньев и шарниров конечностей. Если положения стоп всех шести ног и корпуса зафиксированы, то система становится жесткой, свободные переменные в ней отсутствуют. При известном законе перемещения платформы машины траектории движения вершин всех опорных ног относительно платформы будут однозначно определены. Если количество опорных ног меньше шести, то условие «жесткости» сохраняется, поскольку положение или траектория переноса каждой из «свободных» ног также должны быть заданы.

Полученная система алгебраических уравнений является весьма громоздкой. Перейдем к более простому описанию, исключив уравнения платформы машины. При построении модели будем использовать три координатные системы: систему координат конечностей, систему координат машины и неподвижную систему для отображения движения машины в пространстве.

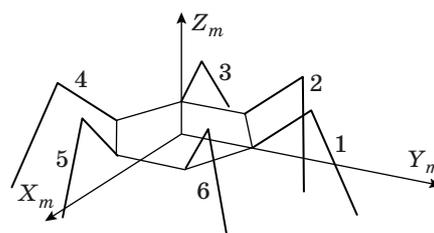
Центр системы координат конечности $X_n Y_n Z_n$ расположен в точке прикрепления ноги к платформе, плоскость $X_n Y_n$ совпадает с плоскостью платформы, ось Y_n направлена от центра платформы к точке крепления промежуточного звена к платформе, ось Z_n — вертикально вверх (рис. 2).

Центр координатной системы корпуса $X_m Y_m Z_m$ расположен в центре шестиугольной платформы. Плоскость $X_m Y_m$ совпадает с плоскостью платформы, ось Y_m направлена в точку крепления первой ноги, ось Z_m направлена вертикально вверх (рис. 3).

Неподвижная система координат XYZ служит для моделирования перемещения машины в пространстве. Все координатные системы — правые.



■ Рис. 2. Геометрическая модель конечности робота



■ Рис. 3. Система координат машины и нумерация ног

Общие геометрические характеристики машины следующие:

- расстояние между точками крепления ног — 25 см;
- длина бедра L_1 — 48 см;
- длина голени L_2 — 60 см;
- длина промежуточного звена L_3 — 14,7 см;
- допустимые значения угла подъема бедра — $-20^\circ < \alpha_1 < 70^\circ$;
- допустимые значения угла поворота голени относительно бедра — $50^\circ < \alpha_4 < 170^\circ$;
- допустимые значения угла разворота ноги — $-55^\circ < \alpha_3 < 55^\circ$.

Кинематическая (геометрическая) модель ноги машины (см. рис. 2) в проекциях на собственную систему координат имеет вид

$$\begin{aligned} x_{n3} &= (L_1 \cos \alpha_1 + L_2 \sin \alpha_2) \cos \alpha_3; \\ y_{n3} &= (L_1 \cos \alpha_1 + L_2 \sin \alpha_2 + L_3) \sin \alpha_3; \\ z_{n3} &= L_1 \sin \alpha_1 - L_2 \cos \alpha_2, \end{aligned} \quad (1)$$

где x_{n3}, y_{n3}, z_{n3} — координаты стопы; L_1, L_2, L_3 — длины бедра, голени и промежуточного звена соответственно; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ — углы подъема бедра, подъема голени (относительно вертикальной оси) и разворота бедра соответственно.

Угол α_4 поворота голени относительно бедра связан с углами α_1 и α_2 соотношением $\alpha_4 = \alpha_2 - \alpha_1 + 90^\circ$. Переход к углу α_2 связан исключительно с компактностью записи уравнений конечности.

Моделирование движения машины

Моделирование машины производится в пакете MatLab.

Для удобства проведения моделирования на основании (1) выполним дифференцирование этой системы уравнений. Результат в матричной форме имеет вид

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{dx_{n3}}{dt} \\ \frac{dy_{n3}}{dt} \\ \frac{dz_{n3}}{dt} \end{bmatrix} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} \frac{d\alpha_1}{dt} \\ \frac{d\alpha_2}{dt} \\ \frac{d\alpha_3}{dt} \end{bmatrix},$$

где v_x, v_y, v_z — составляющие вектора скорости дви-

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} -L_1 \sin \alpha_1 \cos \alpha_3 & L_2 \cos \alpha_2 \cos \alpha_3 \\ -L_1 \sin \alpha_1 \sin \alpha_3 & L_2 \cos \alpha_2 \sin \alpha_3 \\ L_1 \cos \alpha_1 & L_2 \sin \alpha_2 \\ -\sin \alpha_3 (L_1 \cos \alpha_1 + L_2 \sin \alpha_2) \\ \cos \alpha_3 (L_1 \cos \alpha_1 + L_2 \sin \alpha_2) \\ 0 \end{pmatrix}$$

Разрешив систему уравнений относительно производных по углам разворота звеньев, получим

$$\begin{pmatrix} \frac{d\alpha_1}{dt} \\ \frac{d\alpha_2}{dt} \\ \frac{d\alpha_3}{dt} \end{pmatrix} = \mathbf{A}^{-1} \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{pmatrix}$$

После интегрирования системы и перехода к конечным разностям по формуле Эйлера найдем уравнения для определения углов разворота звеньев при заданном векторе скорости стопы ноги в системе координат конечности:

$$\begin{pmatrix} \alpha_1(k+1) \\ \alpha_2(k+1) \\ \alpha_3(k+1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha_1(k) \\ \alpha_2(k) \\ \alpha_3(k) \end{pmatrix} + \mathbf{A}(k)^{-1} \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{pmatrix} \delta, \quad (2)$$

где δ — шаг по времени.

Коэффициенты матрицы \mathbf{A} пересчитываются на каждом шаге в соответствии с новыми значениями углов разворота звеньев ноги.

Модель машины в целом включает уравнения движения всех шести ног в их собственной системе координат. Координация движения ног обеспечивается общим шагом счета и движением стоп опорных конечностей по согласованным векторам скорости.

Первоначально в системе координат машины определяются векторы скорости стоп конечностей, обеспечивающие тот или иной закон движения платформы. Затем рассчитываются значения этих величин в системах координат конечностей и по уравнениям (2) определяются углы разворота звеньев конечностей на очередном шаге счета. После этого по уравнениям (1) находятся координаты узлов звеньев конечностей для анимации модели.

Последовательность вычислений в компьютерной модели машины, реализованной в пакете MatLab, показана на рис. 4.

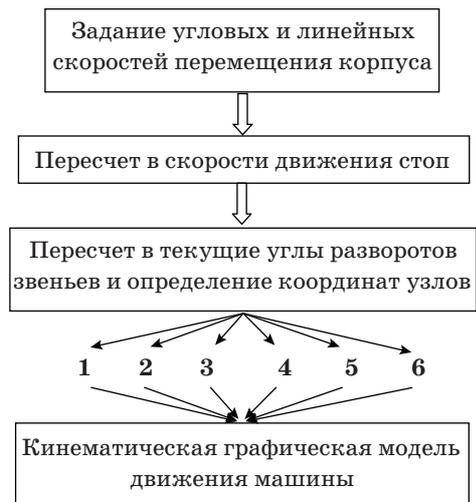
Движение машины будет складываться из поступательного перемещения платформы и вращений платформы вокруг своих координатных осей. Поступательное перемещение платформы в пространстве может быть задано вектором ско-

рости центра масс (или любой другой точки платформы).

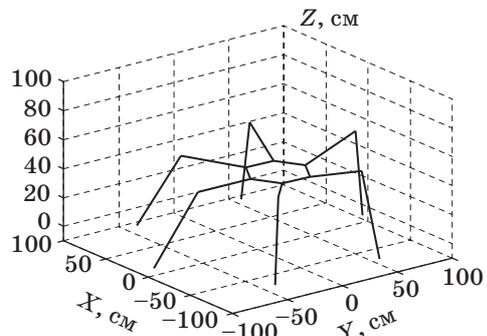
Для вращения платформы вокруг координатных осей вектор скорости стоп должен пересчитываться на каждом шаге в соответствии с положением стоп относительно оси вращения машины и угловой скорости ее вращения. Во всех случаях стопы опорных конечностей в системе координат машины должны двигаться по вектору, противоположному вектору скорости машины.

Для простоты восприятия анимированных изображений при визуализации использовалась модель машины с совмещенными шарнирами верхних частей ног, т. е. принято $L_3 = 0$ (рис. 5).

Компьютерная модель позволяет имитировать и наблюдать различные сценарии движения: перемещение отдельной конечности при закреплении стопы или точки прикрепления бедра, движение корпуса машины при закрепленных стопах ног — покачивание, движение вверх-вниз, хула-хуп, вращение корпуса и др. Проблема реализации походок машины и формирования



■ Рис. 4. Последовательность вычислений при моделировании движения машины



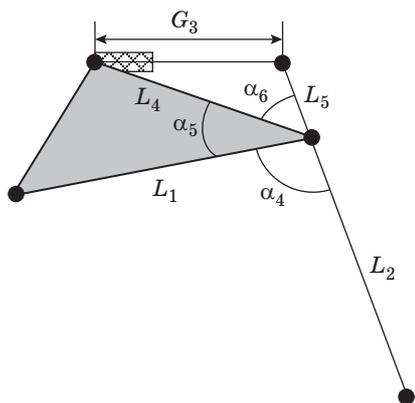
■ Рис. 5. Трехмерная модель робота

стереотипов движения является самостоятельной задачей и в данной работе не рассматривается.

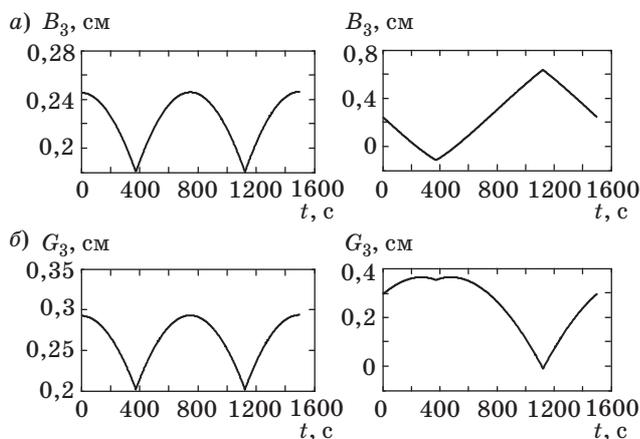
Кинематическая модель гидроприводов

Изменение положения конечностей робота в пространстве происходит за счет изменения углов между звеньями конечностей. В свою очередь величины углов зависят от величин выдвигания штоков гидроприводов. Кинематика работы гидроприводов звеньев ног также может быть представлена в форме геометрической модели. Такая модель для гидропривода голени показана на рис. 6, где $L_4 = 30$ см, $L_5 = 3$ см, $\alpha_5 = 10^\circ$ — конструкционные параметры; G_3 — величина выдвигания штока привода голени. Звенья L_2 и L_5 жестко связаны (звено L_2 является продолжением звена L_5).

По геометрическим моделям могут быть найдены зависимости величин выдвигания штоков



■ Рис. 6. Геометрическая модель гидропривода поворота голени



■ Рис. 7. Графики выдвигания штоков гидроприводов бедра (а) и голени (б) при покачивании корпуса машины (слева) и движениях вверх-вниз (справа)

от углов разворота звеньев ноги. Так, для гидропривода голени получим

$$G_3 = \sqrt{L_4^2 + L_5^2 - 2L_4L_5 \cos \alpha_6},$$

где $\alpha_6 = 180^\circ - \alpha_4 - \alpha_5$; L_4, L_5, α_5 — конструкционные параметры; α_4 — угол подъема голени.

Уравнение для величины выдвигания штока гидропривода бедра выглядит аналогично.

В качестве примера на рис. 7 показаны графики выдвигания штоков гидроприводов бедра и голени для конечности, ориентированной в направлении вектора скорости платформы. Графики слева соответствуют поступательному перемещению платформы машины в исходного положения влево, затем вправо и снова влево, в исходное положение. Графики справа соответствуют движению платформы из исходного положения вверх, затем вниз и снова вверх, в исходное положение.

Отметим, что данные о динамике выдвигания штоков гидроприводов, рассчитанные на компьютерной модели, могут быть непосредственно использованы для управления движением механического макета машины в режиме следящего привода.

Область достижимости ступни робота

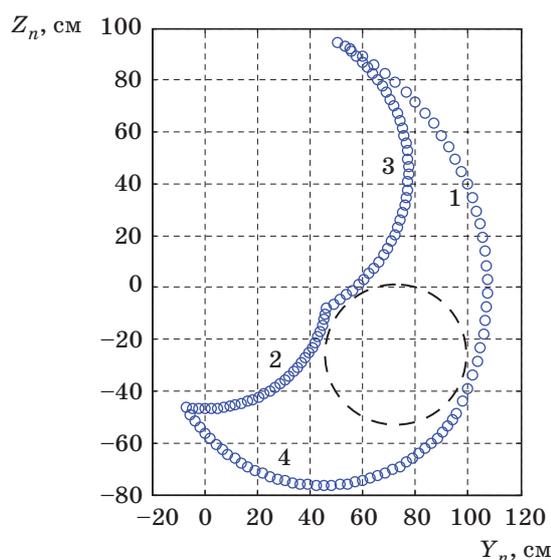
Одной из задач, возникающих на кинематическом уровне, является задача построения области достижимости для ступни ноги робота. Область достижимости ступни определяется длинами звеньев ноги (длиной бедра и голени), а также допустимыми углами отклонения, указанными выше.

Углы α_1 и α_4 (см. рис. 2) задают возможные движения ступни в плоскости ноги. Границы допустимой области в этой плоскости могут быть получены путем поочередного закрепления одного из углов в предельном положении и варьирования второго угла в рамках допустимых значений (рис. 8).

Область достижимости ступни в плоскости ноги представляет собой криволинейный четырехугольник, стороны которого — дуги окружностей. Рассмотрим эти окружности.

Дуга 1 представляет собой траекторию ступни при повороте максимально выпрямленной ноги (угол между бедром и голенью $\alpha_4 = 170^\circ$) вокруг оси X_n в пределах допустимых значений α_1 . Центр соответствующей окружности $Y_n^2 + Z_n^2 = R_1^2$ будет лежать в начале координат, а ее радиус

$$R_1 = \sqrt{L_1^2 + L_2^2 - 2L_1L_2 \cos \alpha_4} = \sqrt{48^2 + 60^2 - 2 \cdot 48 \cdot 60 \cdot \cos 170^\circ} \approx 107,6 \text{ см.}$$



■ Рис. 8. Разрез области достижимости ступни

Дуга 2 представляет собой траекторию ступни при повороте максимально согнутой ноги (угол между бедром и голенью $\alpha_4 = 50^\circ$) вокруг оси X_n в пределах допустимых значений α_1 . Центр соответствующей окружности $Y_n^2 + Z_n^2 = R_2^2$ также будет лежать в начале координат, а ее радиус

$$R_2 = \sqrt{48^2 + 60^2 - 2 \cdot 48 \cdot 60 \cdot \cos 50^\circ} \approx 46,92 \text{ см.}$$

Дуга 3 представляет собой траекторию ступни при сгибании максимально поднятой ноги (угол подъема бедра $\alpha_1 = 70^\circ$) в пределах допустимых значений α_4 . Центр соответствующей окружности $(Y_n - Y_{n3})^2 + (Z_n - Z_{n3})^2 = L_2^2$ является точкой расположения колена при максимально поднятом бедре $Y_{n3} = L_1 \cos 70^\circ \approx 16,42$ см, $Z_{n3} = L_1 \sin 70^\circ \approx 45,11$ см, а ее радиус будет равен L_2 .

Дуга 4 представляет собой траекторию ступни при сгибании максимально опущенной ноги (угол подъема бедра $\alpha_1 = -20^\circ$) в пределах допустимых значений α_4 . Центр соответствующей окружности $(Y_n - Y_{n4})^2 + (Z_n - Z_{n4})^2 = L_2^2$ является точкой расположения колена при максималь-

но опущенном бедре $Y_{n4} = L_1 \cos(-20^\circ) \approx 45,11$ см, $Z_{n4} = L_1 \sin(-20^\circ) \approx -16,42$ см, а ее радиус будет равен L_2 .

Полная область достижимости ступни в трехмерном пространстве образуется поворотом полученного криволинейного четырехугольника вокруг вертикальной оси в пределах допустимых значений α_3 .

Живые организмы при перемещении почти никогда не используют всю область достижимости конечностей. Движение происходит в зоне, наиболее удобной для согласования рабочих и холостых перемещений конечностей и оптимальной с энергетических позиций. В качестве такой зоны в модели машины могут быть приняты сфера или эллипсоид максимального радиуса, вписанные в трехмерную область достижимости (вертикальный разрез такой сферы показан пунктиром на рис. 8). Перемещение стопы прекращается при достижении поверхности сферы. Центр сферы является точкой, в которой находятся стопы работа перед началом перемещения, и конечной точкой положения стоп при завершении движения в заданном направлении. Холостой перенос ног может выполняться по поверхности сферы.

Заключение

Получена кинематическая модель шестиногого шагающего робота в виде системы уравнений. Для организации моделирования различных движений робота построена система разностных уравнений. Найдены уравнения, связывающие величины выдвигания штоков гидроприводов и углы расположения конечности. Построена область достижимости ступни робота и найдены ее аналитические границы. Выполнена реализация полученной кинематической модели в пакете MatLab.

На следующем этапе работы предполагается рассмотреть динамические задачи управления движением шестиногого шагающего робота, а также задачи формирования походок и интеллектуализации управления при движении по сложному рельефу.

Литература

1. Игнатъев М. Б. Кибернетическая картина мира. Теория сложных систем. — СПб.: ГУАП, 2011. — 448 с.
2. Охоцимский Д. Е., Голубев Ю. Ф. Механика и управление движением автоматического шагающего аппарата. — М.: Наука, 1984. — 310 с.
3. Охоцимский Д. Е., Платонов А. К., Кирильченко А. А., Лапшин В. В. Шагающие машины: пре-

принт. — М.: ИПМ АН СССР, 1989. № 87. — 36 с.

4. Ларин В. Б. Управление шагающим аппаратом. — Киев: Наукова думка, 1980. — 168 с.
5. Vukobratović M. Legged Locomotion Robots and Anthropomorphic Mechanisms. — Mihailo Pupin Institute, 1975. — 541 p.
6. Ignatev M. B., Kulakov F. M., Mikhailov V. V., Jurevitch E. I. Control Algorithms of Adaptive Walking Machine // Proc. of the 4th Symp. on Autom. Contr.

in Space, Dubrovnik, 6–10 September 1971. Beograd, 1971. P. 175–184.

7. Ястребов В. С., Игнатьев М. Б., Кулаков Ф. М., Михайлов В. В. Подводные роботы. — Л.: Судостроение, 1977. — 368 с.

8. Лапшин В. В. Механика и управление движением шагающих машин. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2012. — 199 с.

9. Павловский В. Е. О разработках шагающих машин: препринт. — М.: ИПМ РАН, 2013. № 101. — 32 с.

UDC 621.865.8

doi:10.15217/issn1684-8853.2015.6.50

Kinematic Modeling of a Walking Machine

Mikhailov V. V.^a, Dr. Sc., Tech., Professor, mwwcari@gmail.com

Solov'eva T. N.^b, PhD, Tech., Associate Professor, al2tn@yandex.ru

Popov V. P.^b, PhD, Tech., Associate Professor, valery-popov2009@yandex.ru

^aSaint-Petersburg Institute for Informatics and Automation of RAS, 39, 14 Line, V. O., 199178, Saint-Petersburg, Russian Federation

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

Purpose: Developing control systems for walking machines requires their kinematic and dynamic models. The goal of this research is the development of a kinematic model for an active dummy of a hexapod walking machine, getting a visual representation of its movement in space. **Results:** A mathematical description is suggested for a kinematic model of a hexapod as systems of equations to determine the coordinates of the machine units with preset angles between the limb links. A system of difference equations has been obtained which allows you to model the robot motion, controlled by velocity vector. On the base of the model, various types of robot motion were simulated in MATLAB software package. Angles of the robot's limbs are operated via hydraulic drives, and special equations were obtained which determine the relation between the drive rod positions and the angles. To evaluate the robot locomotion ability, the area of its foot reachability was built, and the analytical bounds of that area were specified. **Practical relevance:** The developed model can be used as a basis for a dynamical model when designing and approving the robot motion control algorithms, and for robot dummy control in the follow-up drive mode.

Keywords — Hexapod Robot, Walking Machine, Kinematic Model, Reachability Area, Control by Velocity Vector.

References

1. Ignatev M. B. *Kiberneticheskaja kartina mira. Teoria slozhnykh system* [Cybernetic Picture of the World. Complicated Systems' Theory]. Saint-Petersburg, GUAP Publ., 2011. 448 p. (In Russian).
2. Okhotsimsky D. E., Golubev Iu. F. *Mekhanika i upravlenie dvizheniem avtomaticheskogo shagaiushchego apparata* [Mechanics and Motion Control of an Automatic Walking System]. Moscow, Nauka Publ., 1984. 310 p. (In Russian).
3. Okhotsimsky D. E., Platonov A. K., Cirilchenko A. A., Lapshin V. V. *Shagaiushchie mashiny* [Walking Machines]. Moscow, IPM AN SSSR Publ., 1989, no. 87. 36 p. Preprint (In Russian).
4. Larin V. B. *Upravlenie shagaiushchim apparatom* [Control of Walking Machine]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1980. 168 p. (In Russian).
5. Vukobratović M. *Legged Locomotion Robots and Anthropomorphic Mechanisms*. Mihailo Pupin Institute, 1974. 541 p.
6. Ignatev M. B., Kulakov F. M., Mikhailov V. V., Jurevitch E. I. Control Algorithms of Adaptive Walking Machine. *Proc. 4th Symp. on Autom. Contr. in Space*. Dubrovnik, 1971. P. 175–184.
7. Yastrebov V. S., Ignatev M. B., Kulakov F. M., Mikhailov V. V. *Podvodnye roboty* [Underwater Robots]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1977. 368 p. (In Russian).
8. Lapshin V. V. *Mekhanika i upravlenie dvizheniem shagaiushchih mashin* [Mechanics and Motion Control of Walking Machines]. Moscow, Moskovskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet imeni N. E. Baumana Publ., 2012. 199 p. (In Russian).
9. Pavlovskij V. E. *O razrabotkah shagaiushchih mashin* [About Walking Machines' Development]. Moscow, IPM RAN Publ., 2013, no. 101. 32 p. Preprint (In Russian).

ТЕХНОЛОГИИ РЕШЕНИЯ СЛОЖНЫХ ЗАДАЧ НА ОСНОВЕ ДИНАМИЧЕСКИХ АВТОМАТНЫХ СЕТЕЙ

В. А. Торгашев^а, доктор техн. наук, профессор

И. В. Царев^а, ведущий программист

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

Постановка проблемы: современные суперкомпьютеры, используемые для решения сложных задач, обладают рядом недостатков как по технико-экономическим характеристикам (габариты, энергопотребление, стоимость), так и по сложности программирования реальных задач, требующих специальных приемов распараллеливания программ, в результате чего производительность суперкомпьютеров при решении реальных задач оказывается значительно ниже, чем их теоретическая производительность. Целью работы является разработка методов создания суперкомпьютеров и технологий программирования, основанных на теории динамических автоматных сетей, позволяющих существенно улучшить удельные характеристики суперкомпьютеров, а также упростить параллельное программирование для решения соответствующих задач. **Результаты:** сформулированы базовые принципы создания суперкомпьютеров с динамической архитектурой на основе динамических автоматных сетей, включая реализацию динамических автоматов с использованием либо интегральных микросхем с гибкой программируемой логикой, либо специально разрабатываемых отечественных больших интегральных схем. Это обеспечивает крайне высокую регулярность структуры микросхем, что существенно упрощает создание суперкомпьютеров с динамической архитектурой по сравнению с традиционными суперкомпьютерами. Предложены технологии решения сложных задач с использованием специально разработанного языка программирования, основанного на динамических автоматных сетях, а также метод «гибридного программирования», позволяющий сочетать различные аппаратные и программные средства для решения одной задачи. **Практическая значимость:** предложенные методы дают возможность создавать суперкомпьютеры с динамической архитектурой, многократно (в десятки и сотни раз) превосходящие традиционные суперкомпьютеры по таким удельным (в расчете на единицу производительности) характеристикам, как габариты, энергопотребление и стоимость, при этом структура аппаратной реализации суперкомпьютера значительно упрощается. Предложенные технологии программирования для решения сложных задач, включая «гибридное программирование», упрощают сам процесс параллельного программирования и повышают эффективность решения сложных задач на суперкомпьютерах.

Ключевые слова — динамические автоматные сети, параллельное программирование, суперкомпьютеры с динамической архитектурой.

Введение

За последние десятилетия со времени появления первых персональных компьютеров (ПК) вычислительная техника совершила гигантский скачок в части производительности компьютеров, объемов памяти не только за счет успехов в микроэлектронике, прежде всего микроминиатюризации, увеличения тактовых частот, уменьшения потребления электроэнергии, но и отчасти благодаря изменениям в архитектуре и программном обеспечении. К этому добавилось появление специализированных графических процессоров, которые в настоящее время присутствуют в каждом компьютере на плате графического контроллера (видеокарты), что позволяет весьма эффективно обрабатывать разнообразную графическую информацию и отображать ее на экране монитора.

В результате обычный современный настольный ПК с четырехъядерным процессором и тактовой частотой около 2–3 ГГц на порядки (в сотни и тысячи раз) превосходит по производительности и объемам памяти (как оперативной, так и внешней, дисковой) не только первые ПК, но и лучшие ЭВМ предыдущих поколений, например такие, как БЭСМ-6 или даже первый отечествен-

ный мультипроцессорный вычислительный комплекс «Эльбрус», состоявший из десяти процессоров. То же можно сказать и о любых других ЭВМ 70-х — начала 80-х годов прошлого века, которые занимали целый зал любого вычислительного центра, требовали больших затрат электроэнергии и специального охлаждения (как минимум кондиционирования).

Современный ПК способен успешно и эффективно решать множество разнообразных задач, удовлетворяя потребности самых различных пользователей, работающих с задачами вычислительного характера, с базами данных, с сетями, включая Интернет, с компьютерной графикой и т. д.

Однако существует целый ряд задач, для которых вычислительная мощность даже современных ПК явно недостаточна, но не в том смысле, что на ПК эти задачи совсем невозможно решить, а это решение требует весьма больших затрат времени и объемов дополнительной памяти.

Будем далее называть такие задачи «сложными». К ним относятся, прежде всего, так называемые «массивно-параллельные» задачи, включающие работу с большими матрицами и векторами размерностью в сотни, тысячи и более элементов (для матриц — строк и столбцов), решение

линейных алгебраических уравнений и дифференциальных уравнений большого порядка, а также некоторые задачи искусственного интеллекта, включающие многократный перебор и сравнение различных объектов, распознавание образов, анализ сцен и пр. Также к «сложным» задачам можно отнести некоторое множество задач реального времени, включающее задачи обработки различных сигналов, управления реальными сложными объектами, моделирования в реальном времени сложных объектов и систем и т. д.

Традиционно для решения подобных «сложных» задач используются либо специализированные процессоры или многопроцессорные комплексы, либо высокопроизводительные мультипроцессорные вычислительные системы, называемые «суперкомпьютерами». Производительность лучших современных суперкомпьютеров достигает петафлопного диапазона производительности (10^{15} операций с плавающей точкой в секунду и более), ведутся разработки по созданию суперкомпьютеров экзафлопного диапазона производительности (10^{18} операций с плавающей точкой в секунду и более). Характеристики лучших пятисот суперкомпьютеров дважды в год публикуются на сайте «top500.org». Из них только незначительная часть достигла производительности петафлопного диапазона.

Однако почти все современные суперкомпьютеры обладают рядом существенных недостатков. Прежде всего, это значительные габариты (практически любой современный суперкомпьютер занимает целый зал, как и компьютеры прежних поколений), высокое энергопотребление (обычно это мегаватты электроэнергии, при этом зачастую система охлаждения также потребляет мегаватты, иногда больше, чем сам суперкомпьютер).

Помимо чисто технических характеристик, современные суперкомпьютеры обладают следующим основным недостатком. Они, как правило, построены на множестве обычных последовательных процессоров, основанных на так называемой «традиционной» или «фон-неймановской» архитектуре, предполагающей представление задачи в виде алгоритма, т. е. заранее определенной последовательности действий, предложенной как самим Джоном фон Нейманом (в виде рукописного, неопубликованного, но общеизвестного документа), так и, в некоторой другой форме, Аланом Тьюрингом [1]. Использование в отдельных суперкомпьютерах графических процессоров для работы с большими массивами принципиально ничего не меняет. В любом случае для решения вышеперечисленных задач необходимо искусственное «распараллеливание» вычислительного процесса с применением специальных приемов программирования, требующих весьма высокой квалификации программистов. Также при про-

граммировании таких параллельных процессов следует учитывать характеристики конкретного суперкомпьютера, по крайней мере количество процессоров, объемы памяти и т. д.

Несоблюдение этих требований может в каждом конкретном случае приводить к существенному снижению фактической, реальной производительности. Одной из основных причин этого является так называемый «семантический разрыв» (термин впервые введен Г. Майерсом [2]) между принципиально параллельной структурой решаемой задачи и последовательным характером процессоров (и языков программирования).

Целью данной работы является разработка архитектурных (а в дальнейшем и схемотехнических) решений для создания суперкомпьютеров с динамической архитектурой (СКДА), основанных на теории динамических автоматных сетей (ДАС), а также методов программирования и технологий решения задач с использованием СКДА, что позволит в значительной степени преодолеть вышеуказанные проблемы.

Динамические автоматные сети

В статье В. А. Торгашева [3] показано, что автор алгоритмической модели вычислений Джон фон Нейман сам полагал, что эта модель просуществует не более пятнадцати лет, а будущее — за автоматными сетями, которые он же и предложил в работе о «самовоспроизводящихся автоматах» [4]. Тем не менее уже практически 70 лет алгоритмическая модель существует и доминирует в разработке архитектуры любых компьютеров.

В 80-х годах прошлого века В. А. Торгашев предложил динамические автоматные сети в качестве модели любых вычислений, в том числе и параллельных. Идея ДАС основана на вышеупомянутой работе Джона фон Неймана, а также на работах Улама и Барзиня [5, 6].

Данная статья не предполагает подробного изложения теории ДАС, для ознакомления с теоретическими основами и некоторыми возможными реализациями ДАС отсылаем читателя к работам [7–11]. Однако приведем здесь краткое описание ДАС, достаточное для понимания проблемы.

Динамическая автоматная сеть представляет собой множество «динамических автоматов» (ДА), соединенных между собой «связями» в некоторую сетевую структуру. Каждый ДА — это конечный автомат, свойства которого, помимо обычных множества входов (входной алфавит), множества выходов (выходной алфавит), множества текущих состояний (включая начальное состояние) самого автомата и функции переходов, дополнены множеством связей и множеством функций связей (или одной такой функцией). Множество связей, собственно, и объединяет множество автоматов

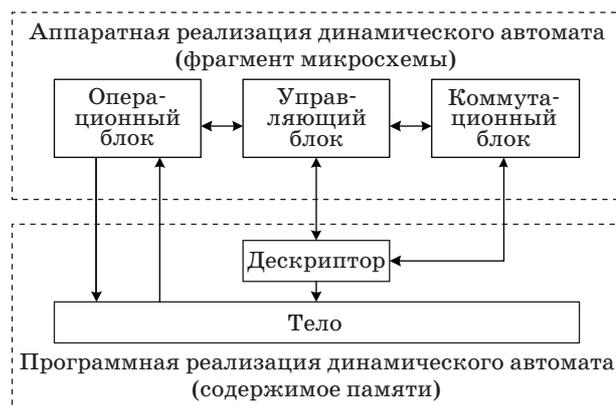
в сеть. Функции связей определяют возможность изменения связей между автоматами в сети, а также порождение новых автоматов или уничтожение автоматов, выполнивших свою функцию, что происходит в процессе решения некоторой конкретной задачи.

Поскольку в любой конкретной физической реализации количество ДА ограничено возможностями аппаратуры, то на практике имеется некоторое множество (список) «свободных автоматов», которые не включены ни в какую ДАС и конкретные функции которых не определены. Таким образом, создание (порождение) новых ДА сводится к исключению их из списка «свободных автоматов» и включению в ДАС посредством определения конкретных связей ДА с другими автоматами ДАС (называемыми «смежными») и приписыванию ДА конкретных функций. Уничтожение автоматов, выполнивших свою функцию, сводится к разрыву связей автомата, исключению его из ДАС и возвращению в список свободных автоматов.

В процессе решения задачи ДАС постоянно меняет свою конфигурацию посредством порождения или уничтожения автоматов, входящих в нее, а также изменения связей между ними. Это называется «автотрансформацией» ДАС. Постоянное изменение конфигурации ДАС, включая и уничтожение автоматов, позволяет существенно сэкономить аппаратные ресурсы и объемы используемой памяти, а также более эффективно задействовать для вычислений всю имеющуюся аппаратуру.

Каждый ДА может быть отнесен к одному из двух основных классов — «операционным автоматам» или «ресурсным автоматам». Первые предназначены для выполнения некоторой вычислительной функции, например некоторой арифметической или логической операции, при этом разрядность аргументов операции (операндов), как и результатов выполнения операции, и формат их представления (разрядность, фиксированная или плавающая точка и т. п.) теоретически могут быть любыми.

«Ресурсные автоматы» являются «хранилищем данных», т. е. содержат данные в любой форме (в том числе в форме ссылок или массивов ссылок на другие ресурсные автоматы, а также на другие, более сложные структуры данных) и могут быть «аргументами» (операндами) операционных автоматов или их «результатами» в зависимости от того, к каким входам или выходам операционного автомата присоединен данный ресурсный автомат посредством ссылок (связей). Они же могут быть не только хранилищем, но и поставщиком данных от некоторого внешнего источника (множества некоторых датчиков, радиолокационных, гидроакустических или телеметрических систем и т. д.).



■ Рис. 1. Аппаратно-программная реализация динамического автомата

Структура аппаратно-программной реализации ДА представлена на рис. 1.

В работе [11] приведен пример автотрансформации ДАС на основе простейшей задачи перемножения двух матриц. К сожалению, объем любой статьи не позволяет привести иллюстрацию более сложных преобразований ДАС (таких как при обработке сигналов по алгоритмам быстрого преобразования Фурье), но вариант программы перемножения матриц является достаточно информативным. Главное здесь заключается в том, что любой операционный автомат, аргументом которого является некоторый массив (матрица, вектор) или структура данных, вместо своей вычислительной функции выполняет функцию порождения «подсетей», в каждой из которых присутствует копия того же операционного автомата, а его аргументами и результатами являются фрагменты исходных и результирующих данных (элементы массивов, строки и столбцы матриц, поля структуры и т. д.).

Таким образом, как правило, в начале решения задачи ДАС расширяется путем порождения новых подсетей и автоматов, а к концу решения — уменьшается, при этом распараллеливание задачи, т. е. разделение задачи на параллельные ветви и их распределение между аппаратными ресурсами, происходит автоматическими. Решением задачи (результатом вычислений) в общем случае является некоторая структура данных (сеть из ресурсных автоматов), потерявшая способность к автотрансформации, поскольку не остается ни одного операционного автомата, способного порождать новые подсети, так как все автоматы, выполнившие свою функцию, уже уничтожены. Такой результат может быть любым способом выведен во внешнюю среду (записан на дисковый накопитель, распечатан, выведен на экран монитора и т. д.). В любом случае распараллеливание вычислительного процесса не требует каких-то особых приемов программирования и каких-либо дополнительных усилий от программиста.

Теперь рассмотрим возможное представление любого ДА и ДАС в целом на уровне аппаратно-программной реализации. Операционный автомат, прежде всего, может быть представлен как фрагмент некоторой интегральной микросхемы, в котором реализована некоторая вычислительная функция (операционный блок). Обычно это схема умножения/деления с плавающей точкой, из которой посредством логического отсеечения отдельных цепей могут быть получены виртуальные устройства для операций с фиксированной точкой или логических операций. Отсечение легко выполняется посредством использования некоторого управляющего двоичного кода, по сути представляющего собой «код операции», биты которого, в зависимости от состояния, разрешают или блокируют те или иные цепи операционного блока. Например, блокировка работы с порядком превращает операцию с плавающей точкой в операцию с фиксированной точкой.

Кроме вычислительной функции, любой автомат обладает также коммутационной и управляющей функциями (и содержит соответствующие аппаратные блоки). Коммутационная функция позволяет передавать информацию между различными автоматами и подсетями (без ущерба для выполнения основной вычислительной функции), порождать новые автоматы и подсети либо уничтожать их. Управляющая функция анализирует состояние (статус) самого автомата и связанных с ним ресурсных автоматов (аргументов и результатов), принимая решение о том, какая из функций автомата будет выполняться (вычислительная функция или порождение/уничтожение подсетей). При этом функции автомата всех трех видов выполняются параллельно и не мешают друг другу, поскольку используют различные фрагменты аппаратуры.

Операционный автомат начинает выполнять свою вычислительную функцию, когда он сам находится в состоянии «готовности», его «аргументы» (ресурсные автоматы) также находятся в том же состоянии, а «результаты» находятся в состоянии «неопределенности».

По завершении выполнения вычислительной функции операционный автомат уничтожается, уничтожаются и его аргументы, если они не являются также аргументами других операционных автоматов. В то же время ресурсный автомат, являющийся «результатом», переходит в состояние «готовности», что может, в свою очередь, вызвать выполнение вычислительной функции некоторого другого операционного автомата, аргументом которого он является.

В то же время каждый автомат (операционный или ресурсный), помимо аппаратного представления, представлен некоторой структурой в

памяти, состоящей в общем случае из двух компонентов — дескриптора и тела.

Дескриптор — это некоторая структура данных, которая содержит информацию о типе автомата (его классе и функции, представленной кодом операции), его состоянии («статусе»), определяющем готовность, неготовность, неопределенное состояние и т. п., а также информацию о связях этого автомата с другими автоматами ДАС (аргументами, результатами). Связи автомата представлены ссылками на дескрипторы «смежных» автоматов, связанных с данным в рамках ДАС. Для «свободных» (т. е. не включенных в ДАС) автоматов «смежными» являются автоматы из множества (списка) «свободных» автоматов. Особо следует отметить, что автомат, породивший некоторую подсеть (т. е. некоторое множество автоматов, связанных между собой), является «хозяином» этой подсети, соответственно, каждый автомат имеет связь (ссылку) с его «хозяином», а «хозяин» имеет в качестве своего «тела» некоторый массив ссылок на порожденные им автоматы. Если «терминальный» автомат, т. е. автомат, не породивший своих «потомков», уничтожается сразу после выполнения своей функции, то «хозяин» может быть уничтожен только после уничтожения всех его «потомков», выполнивших свою функцию.

Структура дескриптора ДА представлена на рис. 2.

«Тело» автомата — это некоторая структура данных в памяти, связанная с данным автоматом посредством ссылок (адресов памяти). Для операционных автоматов это может быть, например, некоторая структура из ссылок на порожденные автоматы (их дескрипторы), для ресурсного автомата — это обычно некоторый массив или структура данных. Уничтожение автомата приводит и к уничтожению его тела, т. е., по сути, к освобождению памяти, занимаемой данным автоматом, который выполнил свою функцию.

Перед выполнением вычислительной функции операционного автомата может быть выполнено «поглощение» операционным автоматом сво-



■ Рис. 2. Структура дескриптора динамического автомата

их аргументов, которое сводится к замене ссылок на «дескрипторы» аргументов (ресурсных автоматов) на прямые адреса массивов, составляющих «тело» автоматов-аргументов. При этом автоматы-аргументы уничтожаются, точнее, уничтожаются их дескрипторы и соответствующие связи.

Возможно также и преобразование класса автомата. Например, операционный автомат, выполнивший свою функцию, может быть преобразован в ресурсный автомат, содержащий результат вычислений (если предварительно выполнено «поглощение» операционным автоматом также и ресурсного автомата, соответствующего своему результату). В этом случае автомат теряет связь со своей операционной функцией (изменяется его тип, код операции и статус), но сохраняет связь с «телом» результата.

Построение СКДА на основе динамических автоматных сетей

Использование «динамической архитектуры» и теории динамических автоматных сетей для разработки СКДА позволяет создавать суперкомпьютеры в широком диапазоне производительности, от нескольких терафлопс (10^{12} операций с плавающей точкой в секунду) до петафлопного и эксафлопного диапазона производительности. При этом не требуется никаких изменений в архитектурных, схемотехнических и программных решениях благодаря свойству СКДА, называемому «неограниченной масштабируемостью». Либо существующие суперкомпьютеры вообще не обладают свойством масштабируемости, либо масштабируемость ограничивается небольшими степенями двойки (2–4–8–16).

Неограниченная масштабируемость СКДА дает потенциальному пользователю возможность наращивать производительность суперкомпьютера по мере возникновения потребности в большей производительности путем добавления новых блоков и соединения их стандартным образом, никак не меняя при этом программное обеспечение.

Важнейшим свойством реализации СКДА является возможность существенного (в разы и даже на порядки) улучшения, по сравнению с существующими суперкомпьютерами, таких удельных (в расчете на 1 терафлопс производительности) характеристик, как габариты, энергопотребление и стоимость. Достигается это за счет отказа от использования сложных последовательных процессоров, работающих на частотах в несколько гигагерц, в пользу простых автоматов, выполняющих всего одну функцию и работающих на частотах в несколько сотен мегагерц, что, в свою очередь, существенно снижает требования к системам охлаждения. Кроме того, использование низких частот позволяет отказаться от сложных

многоуровневых структур памяти (кэш-памяти разных уровней и т. д.), поскольку существующие микросхемы памяти вполне способны работать на этих частотах. А общая эффективность системы достигается благодаря одновременной параллельной работе большого множества ДА.

Реализация множества ДА возможна как с использованием интегральных схем с программируемой (гибкой) логикой, так и на основе специально разработанных «больших интегральных схем», при этом вполне возможна разработка отечественных больших интегральных схем на основе доступных в России технологий (в настоящее время уже доступна технология 28 нм). Количество ДА, реализуемых в одной микросхеме, может исчисляться сотнями тысяч. Соответственно, небольшой образец СКДА с производительностью до 20 терафлопс может содержать многие сотни тысяч или миллионы ДА, имея геометрический объем меньший, чем у системного блока обычного ПК. Пропорционально уменьшается и энергопотребление, и стоимость СКДА.

Существенной особенностью аппаратной реализации СКДА является высокая степень регулярности структуры микросхем, так как блоки всех ДА идентичны.

Программирование, основанное на ДАС, не требует чрезмерно высокой квалификации программистов для решения любых задач, в том числе и «сложных». Любая задача легко может быть представлена в виде сети, в которой присутствуют как объекты (данные, в том числе получаемые с различных физических источников информации — множества датчиков, радиолокационных, гидроакустических, телеметрических и иных систем), так и некоторые операции над этими данными. Такое представление задачи предполагает не столько какие-то особые навыки в программировании, сколько хорошее знание самой задачи и умение изобразить ее в виде сетевой структуры, что не является особо сложным. В то же время распараллеливание задачи в СКДА и распределение фрагментов программы (узлов ДАС) между вычислительными ресурсами происходит автоматически, во время вычислений, без какого-либо участия программиста. Программисту также не требуется иметь какой-либо информации об аппаратных ресурсах (объемах памяти, количестве процессоров или аппаратно реализуемых автоматов). В случае недостатка аппаратных ресурсов порождение новых автоматов приостанавливается, пока не будут освобождены соответствующие ресурсы в результате завершения некоторой части вычислений.

Следует отметить, что типовая архитектура и схемотехника СКДА не предполагает непосредственного присоединения к его аппаратуре каких-либо внешних устройств, таких как запоминающие устройства, мониторы, клавиатуры,

источники сигналов и другой информации и пр., что существенно упрощает структуру самого СКДА. Для этого в состав любого СКДА включается «хост-машина», представляющая собой обычный ПК, который присоединяется к СКДА посредством обычного интерфейса (например, USB). Хост-машина обеспечивает хранение и ввод информации в СКДА, управление процессом загрузки и запуска задач, а также вывод во внешнюю среду результатов.

Еще одной особенностью реализации СКДА на основе ДАС, вытекающей из вышесказанного, является отсутствие собственной операционной системы. В СКДА нет необходимости (и возможности) в организации пользовательского интерфейса, обслуживании файловой системы и внешних устройств — все эти функции выполняются на хост-машине с обычной операционной системой типа Windows или Linux. Функции же операционной системы, связанные с распределением ресурсов, запуском и завершением программ (в данном случае — программ, представленных в виде ДАС), включая распараллеливание вычислительного процесса, выполняются на аппаратном уровне благодаря свойствам динамических автоматов и ДАС в целом.

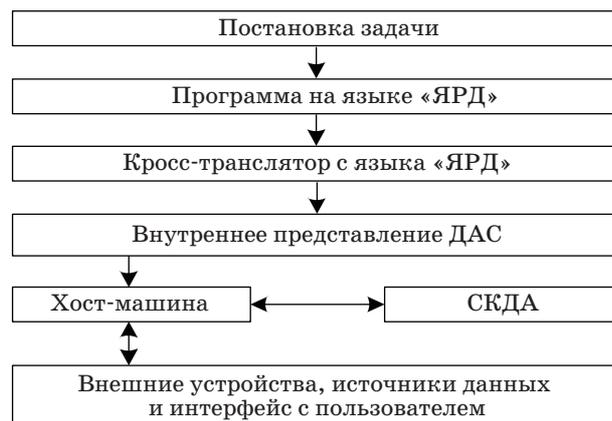
Технологии решения задач в СКДА

Любая технология предполагает наличие некоторых методов, средств и процессов, приводящих от постановки задачи к ее решению. В данном случае метод заключается в использовании ДАС для представления (и выполнения в СКДА) задачи, процесс решения состоит в автотрансформации ДАС, описанной выше. Средства решения задачи состоят в аппаратно-программной реализации ДАС, включая аппаратную реализацию СКДА, разработку средств программирования на основе ДАС, а также средств «гибридного программирования», которые описаны ниже.

Программирование на основе динамических автоматных сетей

Для представления задачи в виде ДАС был разработан специальный язык программирования «ЯРД» (язык рекурсивный динамический) [12] и кросс-транслятор с этого языка во внутреннее представление ДАС (дескрипторы и тела ДА и связи между ними). В настоящее время разрабатывается новый вариант этого языка с учетом изменений в возможной аппаратной реализации, что, скорее всего, приведет к некоторому, но не слишком принципиальному, упрощению языка. Технология решения задач на основе ДАС и языка «ЯРД» представлена на рис. 3.

Главной особенностью языка «ЯРД» является возможность представления программы в двух



■ Рис. 3. Технология решения задач на основе ДАС

формах — графической и текстовой, которые отчасти взаимозаменяют, а в большей степени взаимодополняют друг друга.

Создание графической формы представления программы в языке «ЯРД» обеспечивается некоторым встроенным в транслятор графическим редактором. Практически пользователь (программист) может «нарисовать» ДАС, соответствующую представлению задачи или ее частей, в виде графа (множества графов), при этом используются специальные графические обозначения для операторов, данных, ссылок и других узловых компонентов сетевой программы, а связи между ними представляются стрелками. Могут быть использованы обозначения, стандартные в языке и снабженные идентификаторами или другими обозначениями (например, обозначениями операций). Но их можно, по желанию программиста, заменять на специально созданные специфические обозначения объектов, имеющие вид «иконок».

Транслятор автоматически строит текстовую форму представления программы на основе графической (впрочем, возможно и обратное). Графическая форма является весьма наглядной и позволяет представить общую структуру задачи или ее частей, но отдельные компоненты ДАС и их свойства требуют уточнения на уровне текстовой формы языка (в том числе это возможно в диалоговом режиме посредством заполнения некоторых форм в графическом представлении программы, появляющихся при нажатии кнопки мыши, курсор которой указывает на соответствующий объект).

Программа может быть разработана и исключительно с применением текстовой формы языка, а автоматически формируемая графическая форма может быть в этом случае использована как наглядная иллюстрация.

Текстовая форма языка «ЯРД» во многом по синтаксису напоминает общеизвестный язык Pascal, хотя кардинально отличается в части семантики.

Прежде всего, не имеет никакого значения последовательность «операторов» и «выражений» в тексте программы, поскольку программа — это не описание последовательности действий (алгоритма), а описание начальной сетевой структуры задачи или ее частей, соответствующих ДАС.

В языке отсутствуют циклы, хотя имеется некоторая синтаксическая конструкция «for», которая на самом деле определяет параллельное выполнение ее компонентов.

В языке запрещено повторное присваивание одной и той же переменной (идентификатору) значения какого-то выражения, поскольку каждая переменная представляет собой некоторый объект ДАС, а операция присваивания соответствует связи операционного автомата (или группы операционных автоматов, представленных в виде ДАС) с его результатом, и этот объект может не существовать в момент выполнения присваивания, если одно присваивание этой переменной уже было выполнено. То есть «переменная» (представленная идентификатором) в этом языке — это не указатель на область памяти, а уникальный динамический объект, реализуемый в виде ресурсного динамического автомата. «Выражение» также представляет собой не последовательность действий, а описание соответствующего фрагмента ДАС.

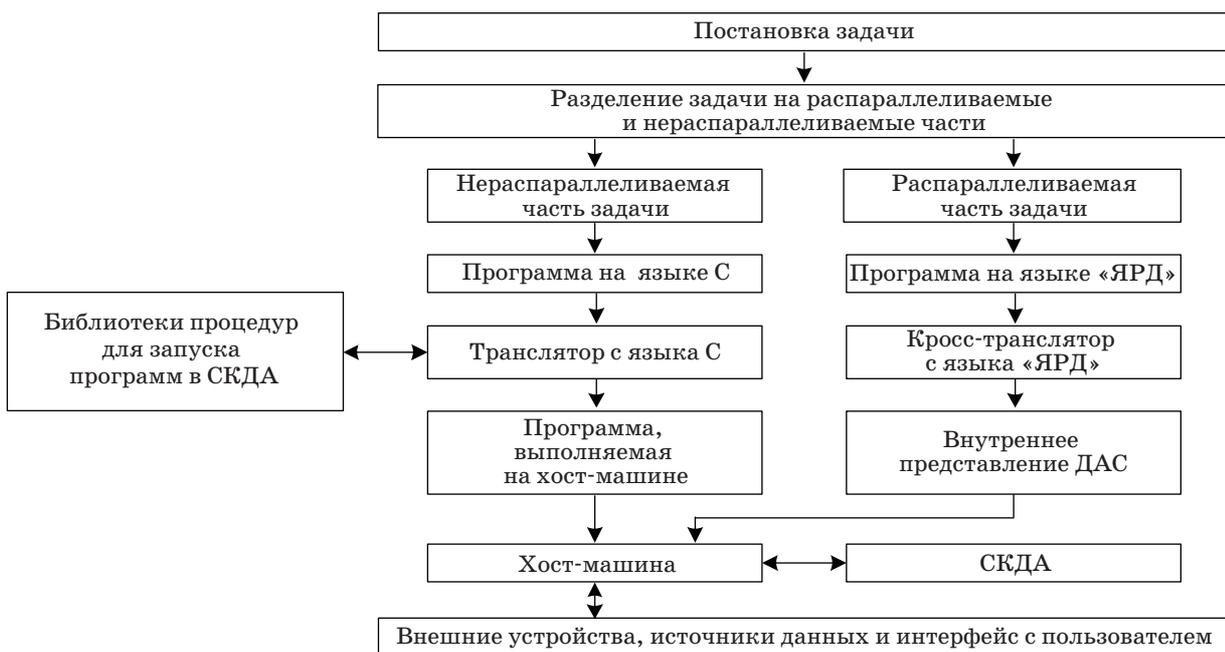
В целом идеология языка «ЯРД» соответствует принципам объектно-ориентированного программирования, т. е. каждый ДА в составе ДАС является, по сути, объектом, содержащим некоторые структуры данных и функции, оперирующие с этими данными, а также с данными, содержащимися в «смежных» ресурсных автоматах.

Гибридное программирование

Анализ структуры множества задач (и соответствующих программ), традиционно решаемых при помощи суперкомпьютеров, приводит к выводу, что значительная часть фрагментов (блоков, модулей, процедур, операторов) каждой из таких программ либо вообще не требует распараллеливания (и высокого уровня производительности), либо их распараллеливание принципиально невозможно. К первым относятся, например, все подготовительные или заключительные вычисления и другие действия, в том числе операторы ввода-вывода, выполняемые один раз (или ограниченное число раз) в процессе работы программы. Ко вторым относятся, например, итерационные циклы, поскольку вычисления в каждом таком цикле зависят от результатов вычислений в предыдущих циклах.

Разумеется, любой суперкомпьютер, в том числе и СКДА, принципиально может выполнить и эти вычисления или прочие действия, однако задействование мощностей многопроцессорного суперкомпьютера для выполнения одиночных или нераспараллеливаемых действий, в то время как значительная часть аппаратуры суперкомпьютера будет в этом случае простаивать, представляется нецелесообразным. Это, кстати, является одной из причин того, что большинство существующих суперкомпьютеров на реальных задачах показывают существенно (во много раз) меньшую производительность, чем на специально отобранных тестовых задачах (например, таких, как общеизвестный тест Linpack).

Технология решения задач на основе «гибридного программирования» представлена на рис. 4.



■ Рис. 4. Технология решения задач на основе «гибридного программирования»

В связи с вышеизложенным возникает идея «гибридного программирования». Суть этой идеи заключается в том, что значительная часть программы, не требующая распараллеливания (или для которой распараллеливание невозможно) программируется на обычных языках программирования (таких как С, С++, Pascal) и выполняется на хост-машине. Для иллюстрации в качестве примера выбран язык С. Те части программы, которые требуют высокой производительности и распараллеливания, отдельно программируются на языке «ЯРД», преобразуются с помощью соответствующего транслятора во внутреннее представление ДАС, а в основную программу, исполняемую на хост-машине, включаются обращения к процедурам из некоторой стандартной библиотеки, которые запускают соответствующие программы, представленные в виде ДАС, в СКДА и возвращают в хост-машину результаты.

Следует отметить, что хотя термин «гибридное программирование» впервые появился именно в данной статье, но соответствующая методика решения задач нами уже применялась неоднократно. Например, в середине 90-х годов она использовалась для решения на макетном образце СКДА задачи моделирования газодинамических потоков в реактивном двигателе, задач фрактальной графики и задачи трехмерного отображения движущихся объектов.

Заключение

Предложенные в статье аппаратно-программные методы реализации суперкомпьютеров с динамической архитектурой (СКДА) и технологии

решения сложных задач в СКДА, основанные на теории динамических автоматных сетей, являются полностью оригинальными и не имеют аналогов в мире. Предложенный язык программирования «ЯРД» также является оригинальным.

Впервые сформулирована идея «гибридного программирования», предполагающая разделение решаемой задачи на распараллеливаемые и нераспараллеливаемые фрагменты, выполняемые при помощи различных аппаратных и программных средств.

Важнейшим результатом работы является возможность избавить программиста при решении сложных задач на суперкомпьютере от необходимости заботиться о распараллеливании вычислительных процессов и учитывать такие аппаратные характеристики, как количество процессоров или объемы памяти, поскольку реализация и работа динамических автоматных сетей предполагает полностью автоматическое распараллеливание и учет ресурсов.

Важным является также «неограниченная масштабируемость» аппаратуры СКДА, позволяющая наращивать вычислительную мощность СКДА по мере надобности, не изменяя программного обеспечения.

Главным практическим результатом является возможность создания СКДА (включая и возможность создания отечественной элементной базы для СКДА), характеристики которого значительно превосходят характеристики существующих суперкомпьютеров по габаритам, стоимости и энергопотреблению, а также технологии разработки соответствующих программ для решения сложных задач.

Литература

1. Turing A. M. On Computable Numbers with an Application to the Entscheidungsproblem // Proc. London. Math. Soc. 1937. Vol. 43. P. 230–265.
2. Майерс Г. Архитектура современных ЭВМ: в 2 кн. — М.: Мир, 1985. Кн. 1. — 364 с.
3. Торгашев В. А. Автоматные сети и компьютеры: история развития и современное состояние // История информатики и кибернетики в Санкт-Петербурге (Ленинграде): сб. — СПб.: Наука, 2012. С. 46–66.
4. J. von Neuman. Theory of Self-reproducing Automata. — Urbana and London: University of Illinois Press, 1966. — 403 p.
5. Ulam S. M. Random Processes and Transformation // Proc. of the Intern. Congress of Mathematicians. Providence. 1950. Vol. 11. P. 264–275.
6. Барзинь Ю. М. Проблема универсальности растущих автоматов // Докл. АН СССР. 1964. Т. 57. № 3. С. 542–545.
7. Торгашев В. А. Динамические автоматные сети // Тр. СПИИРАН. 2013. Вып. 4(27). С. 23–34.
8. Торгашев В. А., Царев И. В. Средства организации параллельных вычислений и программирования в мультипроцессорах с динамической архитектурой // Программирование. 2001. № 4. С. 53–68.
9. Торгашев В. А., Царев И. В. Семейство суперкомпьютеров с динамической архитектурой — концептуальные основы // Искусственный интеллект. 2009. № 3. С. 251–257.
10. Торгашев В. А., Царев И. В. Суперкомпьютерные технологии на базе динамических автоматных сетей // Суперкомпьютерные технологии: разработка, программирование, применение (СКТ-2010): материалы Междунар. науч.-техн. конф. Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2010. Т. 1. С. 161–165.
11. Торгашев В. А., Царев И. В. Динамические автоматные сети как модель параллельных вычислений в мультипроцессорах с динамической архитек-

турой // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2009. № 3. С. 11–20.

12. Царев И. В. ЯРД — язык сетевого программирования в распределенных вычислитель-

ных системах с динамической архитектурой // Искусственный интеллект. 2008. № 3. С. 761–770.

UDC 681.3:681.3.06:681.3.01:681.3.068

doi:10.15217/issn1684-8853.2015.6.57

Technologies of Solving Complicated Problems on the Base of Dynamic Automata Networks

Torgashev V. A.^a, Dr. Sc., Tech, Professor

Tsarev I. V.^a, Leading Programmer, civ@iiias.spb.su

^aSaint-Petersburg Institute for Informatics and Automation of RAS, 39, 14 Line, V. O., 199178, Saint-Petersburg, Russian Federation

Purpose: Modern supercomputers used for sophisticated problems have a number of imperfections concerning both their technical and economic characteristics (size, power consumption, cost) and the complexity of solving real programming problems when special methods are required to make the programs run concurrently. As a result, the actual performance of supercomputers when solving real problems is significantly lower than their theoretical performance. The goal of this research is the development of methods for creating supercomputers and programming technologies based on the theory of dynamic automata networks, which would considerably improve specific characteristics of supercomputers and simplify parallel programming for solving the corresponding tasks. **Results:** Fundamental principles have been formulated for creating dynamic architecture supercomputers based on dynamic automata networks, including the implementation of dynamic automata using either Field Programmable Gate Array or specially developed domestic chips. This provides extremely high regularity of the chip structure, considerably simplifying the development of supercomputers with dynamic architecture compared to the conventional supercomputers. Technologies have been proposed for solving complicated problems using a specially developed programming language based on dynamic automata networks, along with the method of “hybrid programming” which allows you to combine different hardware and software means to solve the same problem. **Practical relevance:** The proposed methods provide the possibility to create supercomputers with dynamic architecture which greatly (ten- or hundredfold) surpass the traditional supercomputers by such specific (calculated for a unit of the performance) characteristics as size, power consumption and cost. At the same time, the supercomputer hardware structure becomes much simpler. The proposed programming technologies for solving complicated problems, including “hybrid programming”, simplify the very process of parallel programming and increase the efficiency of solving complicated problems on supercomputers.

Keywords — Dynamic Automata Networks, Parallel Programming, Supercomputers with Dynamic Architecture.

References

1. Turing A. M. On Computable Numbers with an Application to the Entscheidungsproblem. *Proc. London. Math. Soc.*, 1937, vol. 43, pp. 230–265.
2. Mayers G. Dj. *Advances in Computer Architecture*. Moscow, Mir Publ., 1985, vol. 1. 364 p. (In Russian).
3. Torgashev V. A. Automata Networks: History of Development and Contemporary State. *Istoriia informatiki i kibernetiki v Sankt-Peterburge (Leningrade)* [History of Informatics and Cybernetics in Saint-Petersburg (Leningrad)]. Saint-Petersburg, Nauka Publ., 2012, vol. 3, pp. 46–66 (In Russian).
4. J. von Neuman. *Theory of Self-reproducing Automata*. Urbana and London, University of Illinois Press, 1966. 403 p.
5. Ulam S. M. Random Processes and Transformation. *Proc. of the Intern. Congress of Mathematicians*, Providence, 1950, vol. 11, pp. 264–275.
6. Barzin U. M. The Problem of Universality of Growing Automata. *Doklady AN SSSR*, 1964, vol. 57, no. 3, pp. 542–545 (In Russian).
7. Torgashev V. A. Dynamic Automata Networks. *Trudy SPIIRAN*, 2013, vol. 4(27), pp. 23–34 (In Russian).
8. Torgashev V. A., Tsarev I. V. Means for Organization of Parallel Computations and Programming in Multiprocessors with Dynamic Architecture. *Programmirovanie*, 2001, no. 4, pp. 53–68 (In Russian).
9. Torgashev V. A., Tsarev I. V. A Family of Supercomputers with Dynamic Architecture — Conceptual Basis. *Iskusstvennyi intellekt* [Artificial Intelligence], 2009, no. 3, pp. 251–257 (In Russian).
10. Torgashev V. A., Tsarev I. V. Supercomputer Technologies on the Base of Dynamic Automata Networks. *Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii “Superkomp’iuternye tekhnologii: razrabotka, programirovanie, primeneniye” (SKT-2010)* [Proceedings of International Scientific and Technical Conference “Supercomputer technologies: Development, Programming, Application” (SCT-2010)]. Taganrog, Taganrogskii tekhnologicheskii institut luzhnogo federal’nogo universiteta Publ., 2010, vol. 1, pp. 161–165 (In Russian).
11. Torgashev V. A., Tsarev I. V. Dynamic Automata Networks as a Model of Parallel Computations in the Multiprocessors with Dynamic Architecture. *Vestnik komp’uternykh i informatsionnykh tekhnologii* [Herald of Computer and Information Technologies], 2009, no. 3, pp. 11–20 (In Russian).
12. Tsarev I. V. YARD — a Language for Network Programming in Distributed Computing Systems with Dynamic Architecture. *Iskusstvennyi intellekt* [Artificial Intelligence], 2008, no. 3, pp. 761–770 (In Russian).

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ РАБОЧЕЕ МЕСТО ПРОЕКТИРОВЩИКА ЦИФРОВЫХ РЕГУЛЯТОРОВ КОМАНДНЫХ ПРИБОРОВ

Р. И. Сольнищев^а, доктор техн. наук, профессор

А. И. Каримов^а, аспирант

Т. И. Каримов^а, аспирант

Д. Н. Бутусов^а, канд. техн. наук, ассистент

А. Р. Мкртычян^б, генеральный директор, главный конструктор

Д. О. Якимовский^б, канд. техн. наук, начальник отделения, главный конструктор по направлению

^аСанкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, РФ

^бАО «НИИ командных приборов», Санкт-Петербург, РФ

Постановка проблемы: в настоящее время повсеместно повышаются требования к объектам проектирования в сочетании с сокращением сроков их разработки. Однако для проектирования электронных блоков командных приборов применяется методика, основанная на последовательном маршруте проектирования, приводящая к дефектам, увеличению сроков и цены разработки, особенно на наиболее ответственном раннем этапе проектирования. В то же время все большее распространение получает подход модельного проектирования (*model-based design*), свободный от этих недостатков. Наиболее часто модельное проектирование применяется при создании встраиваемых систем реального времени, к которым относятся цифровые регуляторы командных приборов. **Цель:** разработка структуры, формирование аппаратных и программных блоков автоматизированного рабочего места проектировщика цифровых регуляторов командных приборов, позволяющего снизить количество дефектов, стоимость и сроки разработки за счет применения модельного проектирования. **Результаты:** разработана структура автоматизированного рабочего места проектировщика цифровых регуляторов командных приборов с применением программно-аппаратных средств *National Instruments*. Особенностью предложенного автоматизированного рабочего места является возможность его развертывания с минимальными затратами времени и трудовых ресурсов. Для рабочего места адаптированы методы параллельной декомпозиции звеньев передаточных функций для реализации цифровых регуляторов на базовых матричных кристаллах и программируемых логических интегральных схемах, позволяющие реализовывать регуляторы с параллельной архитектурой, а также алгоритмы построения цифровых регуляторов на базе дельта-оператора, которые обеспечивают возможность синтеза регуляторов при жестких ограничениях на разрядность вычислительного устройства и период дискретизации, производить параметрическую оптимизацию цифровых регуляторов командных приборов. **Практическая значимость:** разработанное автоматизированное рабочее место позволит повысить производительность труда проектировщика цифровых регуляторов командных приборов, качество получаемых регуляторов и приборов в целом.

Ключевые слова — автоматизированное рабочее место, цифровые регуляторы, командные приборы, синтез, базовые матричные кристаллы.

Введение

Комплекс командных приборов предназначен для навигации и управления движением летательных аппаратов [1] и включает в себя гиросtabilизированные платформы, акселерометры, гироскопы и другие приборы.

При проектировании командных приборов основным критерием является точность. Она достигается применением систем стабилизации, коррекции, приведения. В настоящее время и в перспективе в качестве регуляторов в этих системах внедряются цифровые регуляторы, которые обладают известными преимуществами перед аналоговыми.

Проектирование цифровых регуляторов связано с решением целого ряда сложных задач идентификации, синтеза, анализа объектов проектирования, обработки сигналов и др. [2]. Решение

этих задач невозможно без применения средств автоматизированного проектирования, в качестве которых предлагается автоматизированное рабочее место для проектирования цифровых регуляторов командных приборов (АРМ ЦР КП).

Структура АРМ ЦР КП

В мировой инженерной практике все большее значение приобретает модельное проектирование (*model-based design*) — подход, при котором на всех стадиях проектирования используется единая среда разработки и тестирования, а применяемые при проектировании модели являются одновременно и спецификацией объектов проектирования [3]. Особенно эффективно модельное проектирование при создании встраиваемых систем реального времени. Цифровые регуляторы командных приборов относятся именно к этому

классу устройств, и к их разработке целесообразно адаптировать методы модельного проектирования.

Особенности проектирования цифровых регуляторов командных приборов отражаются в аппаратной части, программном комплексе и соответствующих базах данных предлагаемого автоматизированного рабочего места. Применение программно-аппаратного комплекса National Instruments позволяет удовлетворить требования, предъявляемые к рабочему месту, как то: гибкость и надежность алгоритмов и оборудования, простота настройки и эксплуатации. Отличительной особенностью АРМ ЦР КИ является возможность получать проектные решения в короткие сроки, так как не требуется настройка интерфейсов и драйверов; разработчикам предоставляется богатая палитра готовых программных и аппаратных модулей среды NI LabVIEW для решения задач синтеза, идентификации, оптимизации. По своей идеологии предлагаемое автоматизированное рабочее место наиболее полно соответствует принципам модельного проектирования.

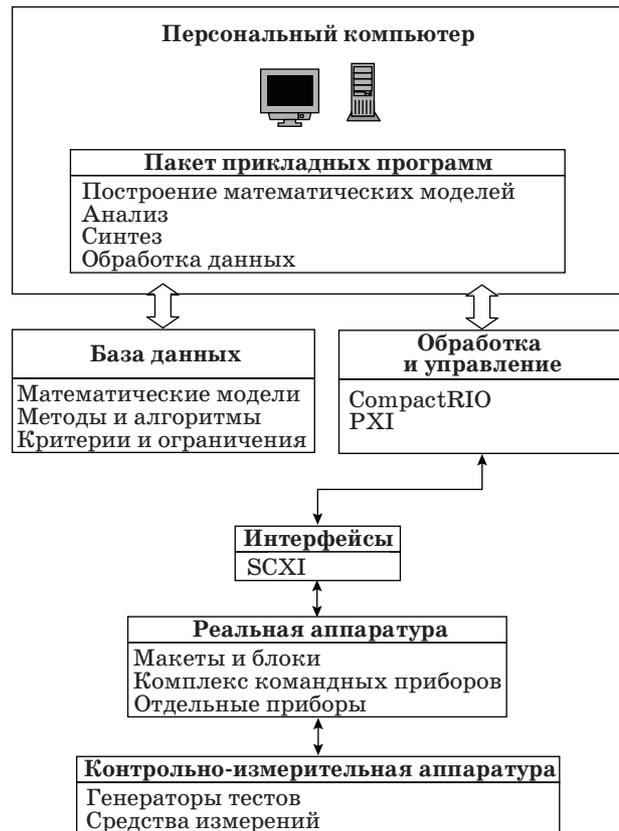
Особо следует отметить эффективность такого рабочего места на этапах испытаний в сочетании со штатной контрольно-измерительной аппаратурой и динамическими моделирующими стендами [2].

Структура АРМ ЦР КИ (рис. 1) разработана на основе программного обеспечения National Instruments LabVIEW и устройств CompactRIO-9012, PXI-7833R, баз данных математических моделей командных приборов, методов и алгоритмов, критериев, статистических данных архивов.

С помощью АРМ ЦР КИ возможно решение следующих задач проектирования командных приборов:

- 1) синтез цифровых регуляторов систем стабилизации, межрамочной коррекции, приведения;
- 2) математическое моделирование командных приборов;
- 3) анализ устойчивости и качества систем стабилизации, межрамочной коррекции;
- 4) анализ точностных характеристик комплекса командных приборов;
- 5) полунаатурное моделирование командных приборов со встроенными микропроцессорами, программируемыми логическими интегральными схемами (ПЛИС), базовыми матричными кристаллами;
- 6) проведение испытаний комплекса командных приборов совместно с контрольно-измерительной аппаратурой;
- 7) идентификация объектов управления и отдельных блоков командных приборов.

Создание математической модели регулятора является наиболее ответственным из этапов про-



■ Рис. 1. Структурная схема АРМ

ектирования. Также крайне важным является обеспечение адекватности работы итогового цифрового регулятора исходной математической модели, для чего в процесс проектирования вводятся этапы идентификации полученного промежуточного проектного решения с петлями обратных связей, что реализует принятую при модельном проектировании парадигму.

Для ускорения процесса идентификации средствами АРМ ЦР КИ на начальных этапах («пршивки» целевого микропроцессорного устройства) в структуру АРМ вводится контрольно-измерительная аппаратура, обеспечивающая отладку и тестирование цифровых регуляторов.

В процессе разработки АРМ ЦР КИ, наряду со стандартными алгоритмами, были применены специальные методы, не входящие в набор алгоритмов, предоставляемых модулями расширения среды National Instruments LabVIEW. Так, алгоритмы синтеза передаточной функции цифрового корректирующего устройства для систем стабилизации и коррекции строились с использованием дельта-оператора [3, 4] либо по методу полиномиальных уравнений [5]. Для реализации на ПЛИС или базовых матричных кристаллах как устройствах, позволяющих формировать параллельную архитектуру вычислителя, приме-

нялись алгоритмы синтеза регуляторов с параллельной структурой [6, 7].

Синтез регулятора производился по следующему алгоритму.

1. Синтез структуры цифрового регулятора.

2. Разложение передаточной функции регулятора на простейшие дроби для уменьшения влияния шумов округления при расчете динамических характеристик системы и проведения параметрической оптимизации за счет распараллеливания алгоритма [7, 8].

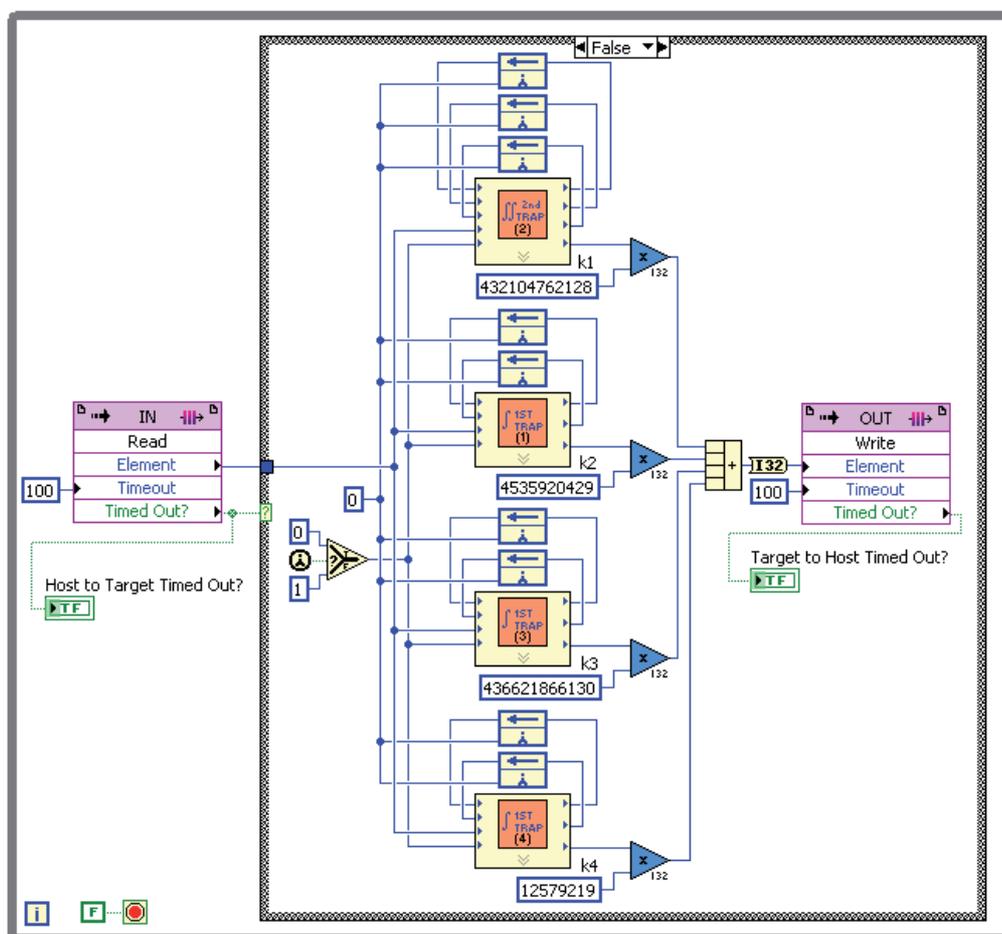
Программирование ПЛИС, на которой реализуется цифровой регулятор, осуществляется напрямую из среды LabVIEW, что значительно упрощает прототипирование. На рис. 2 представлена модель регулятора с фиксированной точкой (32-битное знаковое число), непосредственно предназначенная для создания «прошивки» ПЛИС, которая в дальнейшем тестировалась в составе системы стабилизации. Исполняемый код LabVIEW можно использовать как спецификацию по созданию HDL-моделей при проектировании программ на базовых матричных кристаллах, которые применяются в серийных изделиях.

Применение АРМ для стендовых испытаний ЦР КП

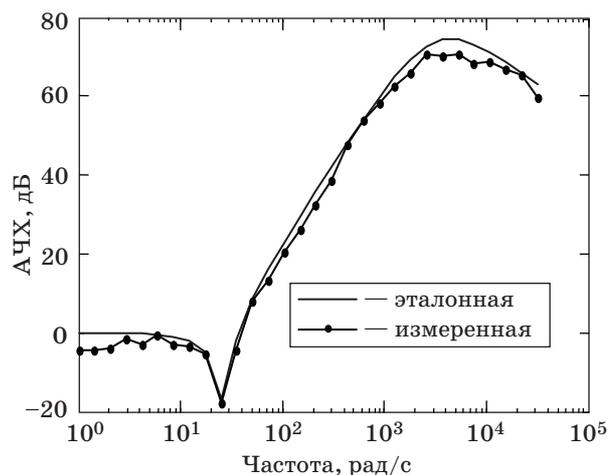
Применение АРМ ЦР КП для стендовых испытаний рассмотрим на примере частотного анализа цифрового регулятора системы стабилизации гиросtabilизатора.

Обычно для снятия частотных характеристик систем на вход устройства подают гармонические сигналы с заранее известным спектром и измеряют соответствующие выходные сигналы. В LabVIEW входит специализированный модуль System Identification Toolbox, позволяющий решать эту задачу.

Созданная в среде LabVIEW с использованием аппаратной платформы NI PXI-7833R, подпрограмма стендовых испытаний цифрового регулятора представляет собой набор виртуальных приборов (VI), снимающих амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) и фазочастотную характеристику электронного блока с цифровым регулятором, подключенного к стенду, и реакцию на ступенчатое воздействие. Разработанное АРМ ЦР КП позволяет проектировщику сначала про-



■ Рис. 2. Модель цифрового регулятора с фиксированной точкой, предназначенная для программирования ПЛИС



■ **Рис. 3.** АЧХ цифрового корректирующего контура, снятой с ПЛИС, встроенной в систему стабилизации гиросtabilизатора

тестировать модель электронного блока с учетом квантования, помех и других факторов, а затем произвести тестирование регулятора в составе реальной аппаратуры с тем, чтобы:

1) оценить близость модели регулятора к соответствующему ей реальному блоку;

2) в случае несовпадения модели регулятора и реальной аппаратуры скорректировать модель, найти и устранить неисправность блока.

Блоки АРМ ЦР КП для частотного анализа были применены при проектировании цифрового регулятора гиросtabilизатора. На рис. 3 представлен фрагмент работы АРМ при снятии АЧХ.

Литература

1. Александров Ю. С. и др. Прецизионный комплекс командных приборов инерциальной системы управления разгонным блоком «Бриз-М» на базе гироскопов с газостатическим подвесом / Ю. С. Александров, В. П. Арефьев, О. А. Артемьев, М. А. Виноградов, В. А. Зелинский, В. М. Костырев, С. Г. Кучерков, А. М. Смирнов, А. В. Сорокин // Гироскопия и навигация. 2000. № 4. С. 5–10.
2. Сольников Р. И. Основы автоматизации проектирования гиросистем. — М.: Высш. шк., 1985. — 240 с.
3. Сольников Р. И., Каримов А. И., Каримов Т. И., Бутусов Д. Н. Проектирование цифровых регуляторов с применением дельта-оператора // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2015. № 9. С. 25–30.
4. Karimov A. I., Karimov T. I. Dynamic SYSTEM SIMULATION using Delta Operator in LabVIEW Environment // Proc. of IEEE Control and Communications Intern. Siberian Conf. (SIBCON-2015), Omsk, 21–23 May 2015. Omsk, 2015. P. 1–4.

Заключение

Предложенное АРМ ЦР является эффективным инструментом проектировщика командных приборов с цифровыми регуляторами как автономного применения, так и в составе других средств автоматизации проектирования комплекса командных приборов. Предварительные оценки практического применения АРМ ЦР КП показали, что за счет уменьшения сроков начальных этапов проектирования, отладки и настройки цифровых регуляторов командных приборов на дальнейших этапах, особенно этапе испытаний, сроки проектирования цифрового электронного блока уменьшаются значительно при достижении требуемых характеристик качества.

Описанное АРМ ЦР КП строится на базе программно-аппаратных решений компании National Instruments, сочетающей в себе гибкость, надежность и малые сроки развертывания. На АРМ ЦР КП реализованы перспективные алгоритмы синтеза цифровых регуляторов, позволяющие реализовывать регуляторы при жестких ограничениях на период дискретизации и длину машинного слова, что типично для регуляторов командных приборов (например, длина машинного слова 16 бит и период дискретизации $T = 10^{-4}$ с). Рассмотренное АРМ ЦР КП является существенным фактором повышения конкурентоспособности продукции предприятия, осуществляющего внедрение автоматизированного рабочего места, на отечественном и мировом рынке в условиях импортозамещения.

5. Волгин Л. Н. Элементы теории управляющих машин. — М.: Сов. радио, 1962. — 163 с.
6. Andreev V. S., Butusov D. N., Karimov A. I., Karimov T. I. Automated Design of Digital Systems with Parallel Architecture // Proc. of Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conf. IEEE NW Russia, Saint-Petersburg, 2–4 Feb. 2015. Saint-Petersburg, 2015. P. 46–48.
7. Андреев В. С., Малютин М. О., Каримов А. И., Каримов Т. И. Комплекс программных средств автоматизации проектирования цифровых систем с параллельной архитектурой // NI Days: сб. тр. XIII Междунар. науч.-практ. конф., Москва, 19–20 ноября 2014 г. М., 2014. С. 116–118.
8. Vishal V., Kumar V., Rana K. P. S., Mishra P. Comparative Study of Some Optimization Techniques Applied to DC Motor Control // Advance Computing Conference (IACC): proc. of 2014 IEEE Intern. Conf., Allahabad, India, 21–22 Feb. 2014. Allahabad, 2014. P. 1342–1347.

UDC 621-05

doi:10.15217/issn1684-8853.2015.6.66

Automated Workplace for a Designer of Digital Controllers for Command Devices

Solnitsev R. I.^a, Dr. Sc., Tech., Professor, remira70@mail.ru

Karimov A. I.^a, Post-Graduate Student, art.krmv@gmail.com

Karimov T. I.^a, Post-Graduate Student, carimus@gmail.com

Butusov D. N.^a, PhD, Tech., Assistant Professor, butusovdn@mail.ru

Mkrtychyan A. R.^b, General Manager, info@niikp.spb.ru

Yakimovsky D. O.^b, PhD, Tech., Head of Department, info@niikp.spb.ru

^aSaint-Petersburg State Electrotechnical University «LETI», 5, Prof. Popov St., 197376, Saint-Petersburg, Russian Federation

^bCommand Devices Research Institute Corporation, 16, Tramvainyi Pr., 198216, Saint-Petersburg, Russian Federation

Purpose: At the date, the requirements to designed object are commonly increasing as well as design terms are reducing. However, the method is used, based on a serial design route, is in use for command devices digital controllers design, leading to errors, longer terms and higher costs of the design, especially on the most valuable, early design stage. At the same time, a model-based design being free from these disadvantages becomes wide spread. The use of the model-based design is especially common for real-time embedded systems development, to which command devices digital controllers refer to. **Results:** A structure of automated workplace for command devices digital controllers design with the use of National Instruments firmware. A specific feature of the proposed workplace is an ability to deploy it with minimum time and labor costs. Parallel decomposition methods for transfer function sections of digital controllers on uncommitted logic arrays and programmable logic devices are adapted, allowing to implement controllers with parallel architecture, as well as algorithms of delta-operator based digital controllers design, which allow to develop controllers when strong restrictions on a computational device word length and the sampling period and parametrically optimize command devices digital controllers. **Practical relevance:** The developed automated workplace will allow increasing command devices digital controllers designers' labor productivity (according to preliminary estimates, about two times), increase the developed controllers quality and devices on the whole.

Keywords — Automated Workplace, Digital Controllers, Command Devices, Design, Uncommitted Logic Arrays.

References

1. Aleksandrov Yu. S., Arefiev V. P., Artemiev O. A., Vinogradov M. A., Zelinsky V. A., Kostyrev V. M., Kucherkov S. G., Smirnov A. M., Sorokin A. V. The Precision Complex of Command Devices of the Inertial Control System for “Briz-M” Booster on the Basis of Gyro Devices with the Gas-static Support. *Giroskopiia i navigatsiia*, 2000, no. 4, pp. 5–10 (In Russian).
2. Solnitsev R. I. *Osnovy avtomatizatsii proektirovaniia giro-sistem* [Basics of Gyro-systems Design Automation]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1985. 240 p. (In Russian).
3. Solnitsev R. I., Karimov A. I., Karimov T. I., Butusov D. N. Digital Controllers Design using Delta-operator. *Izvestiia SPbGETU “LETI”*, 2015, no. 9, pp. 25–30 (In Russian).
4. Karimov A. I., Karimov T. I. Dynamic System Simulation using Delta Operator in LabVIEW Environment. *Proc. IEEE Control and Communications Intern. Siberian Conf. (SIBCON-2015)*, Omsk, 21–23 May 2015, pp. 1–4.
5. Volgin L. N. *Elementy teorii upravliaiushchikh mashin* [Elements of Control Machines Theory]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1962. 163 p. (In Russian).
6. Andreev V. S., Butusov D. N., Karimov A. I., Karimov T. I. Automated Design of Digital Systems with Parallel Architecture. *Proc. of Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conf.*, IEEE NW Russia, Saint-Petersburg, 2–4 February 2015, pp. 46–48.
7. Andreev V. S., Malyutin M. O., Karimov A. I., Karimov T. I. Software Complex for Digital Systems with Parallel Architecture Automated Design. *Sbornik trudov XIII Mezh-dunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii “NI Days”* [Proc. of XIII Intern. Conf. “IN Days”], Moscow, 19–20 November 2014, pp. 116–118 (In Russian).
8. Vishal V., Kumar V., Rana K.P.S., Mishra P. Comparative Study of Some Optimization Techniques Applied to DC Motor Control. *Proc. of 2014 IEEE Intern. Conf. “Advance Computing Conference” (IACC)*, Allahabad, India, 21–22 February, 2014, pp. 1342–1347.

РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНОГО И РАЦИОНАЛЬНОГО ЧИСЛА ВЕТВЕЙ РАЗНЕСЕНИЯ В КАНАЛАХ СВЯЗИ С АДДИТИВНЫМ БЕЛЫМ ГАУССОВЫМ ШУМОМ И ОБЩИМИ ЗАМИРАНИЯМИ РАЙСА — НАКАГАМИ

Н. В. Савищенко^а, доктор техн. наук, профессор

О. А. Остроумов^а, адъюнкт

^аВоенная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного, Санкт-Петербург, РФ

Введение: как правило, в реальных каналах связи присутствуют общие частотно-неселективные замирания, которые традиционно описываются математическими моделями Райса, Релея, Накагами. Для уменьшения влияния замираний в канале связи широкое применение нашел разнесенный прием, заключающийся в объединении на приеме сигналов, поступивших по L независимым каналам связи с замираниями. **Цель:** оценка помехоустойчивости в канале связи с замираниями при использовании разнесенного приема многопозиционных сигналов и выбор оптимального или рационального количества ветвей разнесения при различных видах разнесения. **Результаты:** представлена математическая модель канала связи с общими замираниями и аддитивным белым гауссовым шумом, предложены точные формулы для расчета вероятностей средней битовой ошибки при когерентном приеме сигналов квадратурной амплитудной модуляции и фазовой модуляции и использовании различных видов разнесенного приема. Проведены расчет энергетического выигрыша от использования различных видов разнесенного приема сигналов квадратурной амплитудной модуляции для однородного канала связи и расчет вероятности средней битовой ошибки для неоднородного канала при пространственном разнесении по двум каналам. Показано, что при большом отношении сигнал/шум $\gamma_{\text{pc}} \gg 1$ практически отсутствует зависимость энергетических потерь от коэффициента эффективности λ использования мощности передатчика и позиционности сигналов M . **Практическая значимость:** предложенные методики выбора оптимального и рационального количества ветвей при различных видах разнесенного приема многопозиционных сигналов по критерию минимума вероятности средней битовой ошибки при фиксированном отношении сигнал/шум могут быть использованы при разработке аппаратуры автовыбора ветвей в системах связи с разнесенным приемом.

Ключевые слова — разнесенный прием, помехоустойчивость, многопозиционные сигналы, вероятность битовой (символьной) ошибки.

Введение

Помехи, присутствующие в каналах связи, могут носить различный характер: мультипликативные и аддитивные, межсимвольные и адаптивные, искусственные и естественные, преднамеренные и непреднамеренные и т. д. В данной статье рассмотрено влияние на канал связи общих замираний, возникающих вследствие многолучевого распространения и характеризующихся случайными изменениями коэффициента передачи канала μ . Если предположить, что коэффициент передачи практически не меняется на тактовом интервале времени и на разных интервалах времени коэффициенты передачи являются независимыми, то методика вычисления вероятности ошибки в этом случае известна. При этом возникают две частные задачи. Во-первых, необходимо получить точные формулы символьной (битовой) вероятности ошибки приема многопозиционных сигнальных конструкций в канале связи с аддитивным белым гауссовым шумом (АБГШ). Во-вторых, на основе выбранной математической модели замираний — плотности распределения вероятности коэффициента передачи $\omega(\mu)$ — осуществить интегрирование соответствующих вероятностей ошибок с весовой

функцией $\omega(\mu)$. В последнем случае требуется применять именно точные формулы, иначе при использовании, например, верхней аддитивной границы вероятности ошибки возникающая в этом случае вычислительная погрешность будет значительно усложнять анализ реального влияния замираний на помехоустойчивость. В рамках четырехпараметрической гауссовой модели канала для описания общих частотно-неселективных замираний наиболее часто выбирают распределения Релея и Райса, полученные на основе математических методов, отражающих физические свойства каналов связи. Если экспериментальные данные не очень хорошо согласуются с распределениями Релея и Райса, в качестве плотности распределения коэффициента передачи можно воспользоваться распределением Накагами, и тогда задача интегрирования вероятности ошибки, ввиду относительной простоты аналитического выражения для распределения Накагами, значительно упрощается. Более удобным представляется использование распределения Райса — Накагами, частными случаями которого являются распределения Релея, Райса и Накагами.

Известно, что одним из наиболее эффективных способов борьбы с замираниями является

разнесенный прием [1–3]. Он позволяет без увеличения мощности передатчика значительно повысить помехоустойчивость системы связи, однако в этом случае задача интегрирования значительно усложняется, так как фактически для основных методов разнесения необходимо вычислять L -кратный интеграл. Существуют различные методы разнесенного приема сигналов, которые требуют организации и схем комбинирования нескольких путей передачи (приема) сигналов, называемых ветвями разнесения, или выбора одного из них. В зависимости от системы связи и характера распространения радиоволн различают следующие основные виды разнесенного приема: пространственное, угловое, поляризационное, частотное, временное.

Выбор количества ветвей разнесения может определяться по различным критериям: минимальной стоимости, максимальной помехоустойчивости или помехозащищенности и т. д. В данной статье критерием выбора числа ветвей является минимум средней вероятности битовой ошибки: $L_{opt} = \arg \min_L P_b(L, \gamma_{bc}^*)$, где вероятность ошибки в общем случае зависит от отношения сигнал/шум и от параметров, характеризующих замирания.

Проведенный анализ [1] показал, что в зависимости от вида разнесения существует оптимальное количество ветвей разнесения L_{opt} , при котором достигается $\min_L P_b(L, \gamma_{bc}^*)$ (частотное

разнесение, реализованное на одном передатчике), либо рациональное количество ветвей разнесения L_{ratio} (временное разнесение), при котором дальнейшее увеличение числа ветвей не является эффективным, так как приводит лишь к незначительному снижению вероятности ошибки. Исходя из этого практический интерес представляет нахождение L_{opt} и L_{ratio} при использовании на передаче сигнальных конструкций, применяемых в современных стандартах связи.

Вопросам оценивания помехоустойчивости и использования разнесенного приема посвящены работы И. С. Андропова, Д. Л. Бураченко, Д. Д. Кловского, Л. М. Финка, М.-S. Alouini, N. C. Beaulieu, G. K. Karagiannidis, M. K. Simon и др. [2–5].

Для определения L_{opt} и L_{ratio} необходимо разработать методику оценки помехоустойчивости при разнесенном приеме многопозиционных сигналов в канале связи с АБГШ и общими замираниями.

Для достижения поставленной цели необходимо решить ряд частных задач:

1) получить аналитические выражения для вероятности символьной (битовой) ошибки в канале связи с АБГШ и общими замираниями при разнесенном приеме;

2) разработать методику выбора оптимального (рационального) количества ветвей разнесения;

3) используя полученную методику, определить L_{opt} и L_{ratio} для различных видов разнесения и отношения сигнал/шум.

Методика расчета вероятности битовой (символьной) ошибки при разнесенном приеме в канале с общими замираниями

Рассмотрим математическую модель канала связи с разнесенным приемом.

Пусть для передачи информации используется M сигналов $s_r(t)$, $t \in [0, T]$, $r = \overline{0, M-1}$, имеющих конечную энергию и передаваемых на интервале $T = T_b \log_2 M$, T_b — длительность одного бита. Рассмотрим математическую модель канала связи [1, 6]

$$y_l(t) = \mu_{c,l}(t)s_{r,l}(t) + \mu_{s,l}(t)\widehat{s_{r,l}}(t) + n_l(t), \quad 0 \leq t \leq T,$$

где $y_l(t)$ — принятый сигнал в l -й ветви; $\mu_{c,l}(t)$, $\mu_{s,l}(t)$ — синфазный и квадратурный коэффициенты передачи канала в l -й ветви, $l = \overline{1, L}$; $s_{r,l}(t)$ — передаваемый сигнал; $n_l(t)$ — аддитивная помеха в l -й ветви, представляющая собой белый гауссовый шум с односторонней спектральной плотностью мощности шума $N_0/2$. Для каналов с общими неселективными замираниями коэффициент передачи $\mu_l(t) = \mu_l$ является случайной величиной.

Для анализа помехоустойчивости сигнальных конструкций при разнесенном приеме воспользуемся следующими предположениями: в каждой ветви разнесения осуществляется однолучевой прием сигналов; число ветвей разнесения $L \geq 1$; величина γ_0 есть среднее отношение энергии сигнала к спектральной плотности шума (помехи), которое было бы, если бы тот же передатчик использовался для одиночного приема; для любой ветви разнесения помеха является АБГШ с односторонней спектральной плотностью мощности шума $N_0/2$ и коэффициентом передачи μ_l , $l = \overline{1, L}$; сигналы во всех ветвях некоррелированы; в каждой ветви разнесения отношение сигнал/шум есть величина $\gamma_l = E_l/N_l$, $l = \overline{1, L}$; для разнесенного приема справедливо соотношение $\gamma_L = \gamma_0/L^\lambda$, где γ_0 — среднее отношение сигнал/шум в одной отдельной ветви разнесения и $\lambda \in [0, 2]$ — коэффициент эффективности использования мощности передатчика при разнесенном приеме [1, 6].

Отношение сигнал/шум при оптимальном когерентном приеме и некоррелированной по отдельным ветвям помехи равно сумме всех отношений каждой из ветвей [1, 6]:

$$\gamma_\Sigma = \sum_{l=1}^L \gamma_l = \gamma \sum_{l=1}^L \delta_l^2 = \gamma \Delta_L, \quad 0 \leq \Delta_L \leq L,$$

где $\delta_l^2 = \frac{\gamma_l}{\gamma_1}$, $\gamma = \gamma_l$, тогда, если предположить упорядоченность по мощности, справедливо неравенство $\delta_1^2 \geq \delta_2^2 \geq \dots \geq \delta_L^2$, $\delta_1^2 = 1$. При переходе от одиночного к разнесенному приему энергетический выигрыш $\eta_\Sigma^2 = \frac{\gamma_\Sigma}{\gamma_0} = \frac{1}{L^\lambda} \sum_{l=1}^L \delta_l^2$. Если в канале связи присутствуют замирания, то

$$\gamma_{l,\mu} = \frac{\mu_l^2}{\mu_l^2} \gamma_l, \quad \overline{\mu_l^2} = m_{2,l} = \int_0^\infty \mu_l^2 \omega(\mu_l) d\mu_l, \quad l = \overline{1, L},$$

где $\omega(\mu)$ — плотность распределения вероятности коэффициента передачи μ_l для l -й ветви.

В теории связи для описания замираний в канале связи наибольшее применение нашли плотности распределения вероятностей Релея, Райса и Накагами [1, 2, 6], поэтому для дальнейших исследований удобно рассмотреть обобщенное распределение Райса — Накагами $RN(p, \gamma, \beta)$ [6]:

$$\omega(\mu) = \frac{(\beta\mu)^p}{\gamma^{p-1}} \exp\left(-\frac{\gamma^2}{2\beta} - \frac{\beta}{2}\mu^2\right) I_{p-1}(\gamma\mu), \quad (1)$$

включающее в себя, как частный случай, плотности распределения Релея, Райса и Накагами. Введем понятие коэффициента глубины замираний для распределения Райса — Накагами: $k^2 = \frac{\gamma^2}{2\beta}$. Плотность распределения Райса — Накагами определяется параметрами p, γ, β, k^2 : для

распределения Релея $p = 1, \gamma = 0, \beta = 1/\sigma^2, k^2 = 0$; для распределения Райса $p = 1, \gamma = \mu_0/\sigma^2, \beta = 1/\sigma^2, k^2 = \frac{\mu_0^2}{2\sigma^2}$; для распределения Накагами $p = m, \gamma = 0, \beta = 2m/\mu^2 = 2m/\Omega, k^2 = 0$.

Полная вероятность ошибки в канале с разнесением и некоррелированными по ветвям замираниями (независимо от вида замираний) имеет вид [1, 5, 6]

$$\overline{P}_{elb} = \mathbb{E}P_{elb} = \int_0^{+\infty} \dots \int_0^{+\infty} P_{elb} \left(\gamma_{bc} \sum_{l=1}^L \delta_l^2 \mu_l^2 / \overline{\mu_l^2} \right) \times \prod_{l=1}^L \omega(\mu_l) d\mu_1 \dots d\mu_L, \quad (2)$$

где P_{elb} — вероятность символьной (битовой) ошибки в канале с детерминированными параметрами и белым шумом; μ_l — коэффициент передачи в l -й ветви, $l = \overline{1, L}$.

Известно, что вероятность символьной (битовой) ошибки при когерентном приеме в канале с детерминированными параметрами и АБГШ может быть представлена в виде [6]

$$P_{elb}(\gamma_{bc}) = \sum_k a_k T(\alpha_k \sqrt{\gamma_{bc}}, \eta_k), \quad (3)$$

где $\alpha_k = \sqrt{2g_k}$.

Из (2) с учетом (3) следует, что для расчета полной вероятности ошибки в канале связи с разнесением необходимо вычислить интеграл

$$J_L = \int_0^\infty \dots \int_0^\infty T \left(\alpha \sqrt{\gamma_{bc} \sum_{l=1}^L \delta_l^2 \frac{\mu_l^2}{\overline{\mu_l^2}}}, \eta \right) \prod_{l=1}^L \omega(\mu_l) d\mu_1 d\mu_2 \dots d\mu_L = \frac{1}{2\pi} \int_0^\eta \frac{1}{1+x^2} \prod_{l=1}^L \left(\int_0^\infty e^{-\frac{\alpha^2 \gamma_{bc} \delta_l^2 \mu_l^2}{2} \frac{1+x^2}{\mu_l^2}} \omega(\mu_l) d\mu_l \right) dx. \quad (4a)$$

Преобразовав формулу (4a) с учетом (1), получим выражение, по своей структуре похожее на H -функцию [6]:

$$J_L = H_p((z_L), (b_L), \eta) = \frac{1}{2\pi} \prod_{l=1}^L (1-b_l^2)^p \int_0^\eta \frac{1}{1+x^2} \frac{1}{\prod_{l=1}^L (1+b_l^2 x^2)^p} e^{-\frac{1}{2}(1+x^2) \sum_{l=1}^L \frac{z_l^2}{1+b_l^2 x^2}} dx, \quad (4б)$$

где $(z_L) = z_1, z_2, \dots, z_L$ и $(b_L) = b_1, b_2, \dots, b_L$ — специальные векторы; $b_l^2 = \frac{\alpha^2 \gamma_{bc} \delta_l^2}{\alpha^2 \gamma_{bc} \delta_l^2 + \mu_l^2 \beta_l}$ и $z_l^2 = \frac{\gamma_l^2}{\beta_l} b_l^2$.

Если при разнесенном приеме каналы связи однородные, т. е. статические параметры одинаковы: $b_l^2 = b^2, z_l^2 = z^2, l = \overline{1, L}$, тогда

$$H_p^{(L)}(z_L, b_L, \eta) = H_{pL}(z\sqrt{L}, b, \eta) \text{ и } H_p^{(1)}(z, b, \eta) = H_p(z, b, \eta),$$

где [6]

$$H_v(z, b, \eta) = \frac{(1-b^2)^v}{2\pi} \int_0^\eta \frac{1}{1+x^2} \frac{1}{(1+b^2 x^2)^v} e^{-\frac{z^2}{2} \frac{1+x^2}{1+b^2 x^2}} dx, \quad v \geq 0, 0 \leq b^2 \leq 1, \eta \geq 0. \quad (5)$$

При проведении численных расчетов (5) можно записать в виде

$$H_v(z, b, \eta) = \frac{(1-b^2)^v \operatorname{arctg} \eta}{2\pi} \int_0^{\operatorname{arctg} \eta} \frac{\cos^{2p} t}{(1-(1-b^2)\sin^2 t)^v} e^{-\frac{z^2}{2} \frac{1}{1-(1-b^2)\sin^2 t}} dt.$$

Для численных расчетов H -функции можно воспользоваться также выражениями, представленными в работе [7].

Полученные соотношения могут быть использованы для произвольных двумерных сигнальных конструкций, однако в дальнейшем ограничимся численными расчетами вероятности ошибки при передаче сигналов многопозиционных фазовой модуляции (ФМ) и квадратурной амплитудной модуляции (КАМ), широко применяемых в современных телекоммуникационных стандартах. Для других сигнальных конструкций расчеты могут быть проведены по формулам вероятностей ошибок [6].

Для сигналов ФМ- M , где $M \geq 8$, средняя вероятность битовой ошибки

$$P_b = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^{M/4} \left[\omega_j T \left(\sqrt{2\gamma_{bc} K} \sin \frac{(2j-1)\pi}{M}, \operatorname{ctg} \frac{(2j-1)\pi}{M} \right) + \frac{8}{M} Q \left(\sqrt{2\gamma_{bc} K} \sin \frac{(2j-1)\pi}{M} \right) \right],$$

где $P_b = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K P_{bi}$ — средняя вероятность битовой ошибки, $K = \log_2 M$; $\omega_j = \frac{1}{M} \sum_{i=3}^K 2^{i+1} (-1)^{\operatorname{ent} \left(\frac{j-1}{2^{K+1-i}} \right)}$;

$T(z, a) = \frac{1}{2\pi} \int_0^a \frac{1}{1+x^2} e^{-\frac{z^2}{2}(1+x^2)} dx$ — функция Оуэна, $z \geq 0, a \geq 0$; $Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-\frac{t^2}{2}} dt$ — функция Гаусса.

Для сигналов КАМ- M при $M = 2^K$ средняя вероятность битовой ошибки рассчитывается по формуле

$$P_b = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^{\sqrt{M}-1} a_{2j-1} Q \left((2j-1) \sqrt{\frac{3 \log_2 M}{M-1} \gamma_{bc}} \right), \quad (6)$$

где, например, при $M \leq 64$

$$a_1 = 4 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}} \right); \quad a_3 = 4 \left(1 - \frac{2}{\sqrt{M}} \right); \quad a_5 = -\frac{4}{\sqrt{M}}; \quad a_7 = 0; \quad a_9 = 4 \left(\frac{1}{2} - \frac{3}{\sqrt{M}} \right);$$

$$a_{11} = 4 \left(\frac{1}{2} - \frac{4}{\sqrt{M}} \right); \quad a_{13} = -4 \left(\frac{1}{2} - \frac{3}{\sqrt{M}} \right); \quad a_{15} = -4 \left(\frac{1}{2} - \frac{4}{\sqrt{M}} \right);$$

общая формула для расчета коэффициентов a_{2j-1} при $M \geq 4$ представлена в работе [6].

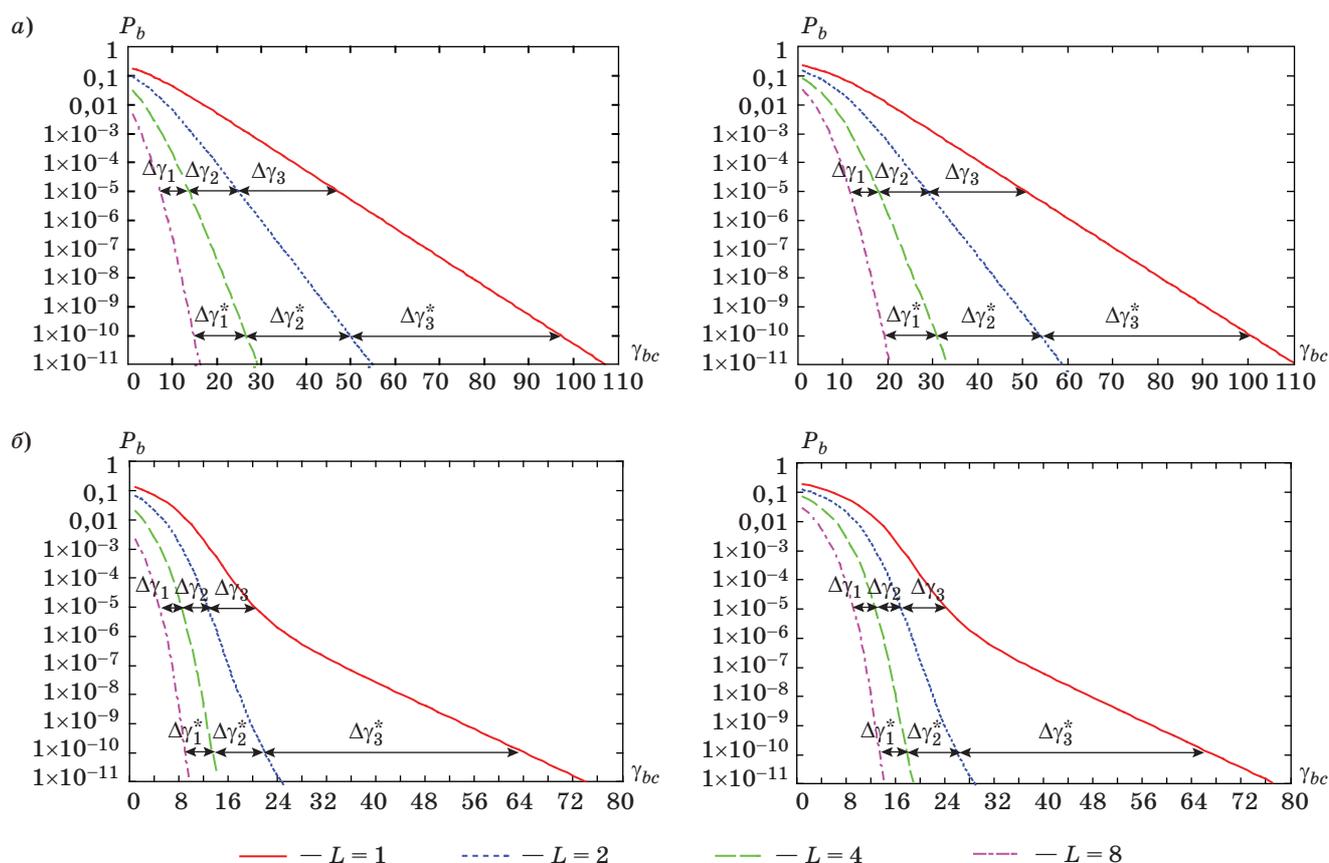
Результаты расчета вероятности битовой ошибки при пространственном разнесении приеме

Используя вышеприведенные результаты, с учетом (4) и (6) формулу для расчета вероятности битовой ошибки при разнесении приеме сигналов КАМ- M и общих замираниях Райса — Накагами можно записать в виде

$$P_b = \frac{2}{K} \sum_{j=1}^{\sqrt{M}-1} a_{2j-1} H_L \left(\begin{matrix} \sqrt{L} \sqrt{\frac{2k^2 g_{2j-1} \gamma_{bc}}{g_{2j-1} \gamma_{bc} + L^\lambda (k^2 + 1)}}, \\ \sqrt{\frac{g_{2j-1} \gamma_{bc}}{g_{2j-1} \gamma_{bc} + L^\lambda (k^2 + 1)}}, \infty \end{matrix} \right),$$

где $k^2 \geq 0$ — коэффициент, который характеризует глубину замираний (при $k^2 \rightarrow \infty$ канал без замираний); $g_{2j-1} = (2j-1)^2 \frac{3K}{2(M-1)}$.

Как видно из полученных зависимостей (рис. 1, а, б), увеличение числа ветвей разнесения при коэффициенте использования мощности передатчика $\lambda = 0$ и общих замираниях в канале связи всегда приводит к повышению помехоустойчивости. Например, при передаче сигналов КАМ-64 в канале с райсовскими замираниями для вероятности ошибки $P_b = 10^{-5}$ и двух ветвей разнесения обеспечивается энергетический выигрыш порядка 7 дБ, при четырех — 11 дБ, восьми — 14 дБ. На практике обычно используют две-три ветви разнесения, так как увеличение ветвей связано с материальными и техническими затратами, а необходимый выигрыш считается достаточным при небольшом количестве ветвей разнесения. Результаты анализа графиков рис. 1 представлены в табл. 1, где $\Delta\gamma_{bc*} = \Delta\gamma_{bc}(L) - \Delta\gamma_{bc}(L-1)$ для сигналов КАМ-16 и $\Delta\gamma_{bc} = \Delta\gamma_{bc}(L) - \Delta\gamma_{bc}(L-1)$ для сигналов КАМ-64.



■ Рис. 1. Зависимость $P_b(\gamma_{bc})$ при приеме сигналов КАМ-16 (слева) и КАМ-64 (справа) в канале с релейскими при $k^2 = 0$ (а) и райсовскими при $k^2 = 10$ (б) замираниями и пространственным разнесением ($\lambda = 0$)

■ Таблица 1. Энергетический выигрыш в канале связи с замираниями и пространственным разнесением

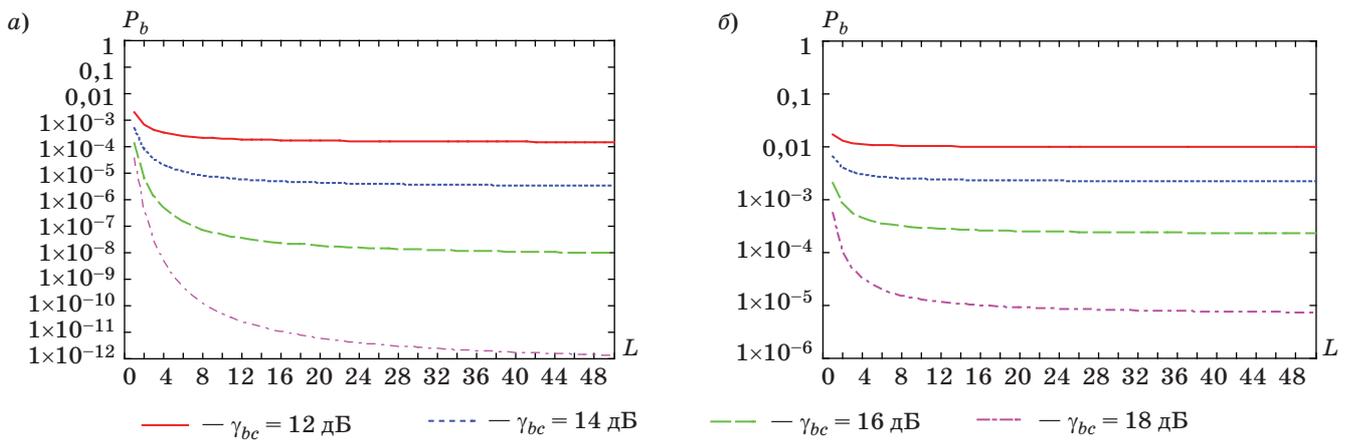
L	$\Delta\gamma_{bc}$, дБ, для КАМ-16		$\Delta\gamma_{bc}^*$, дБ, для КАМ-64	
	$P_b = 10^{-5}$	$P_b = 10^{-10}$	$P_b = 10^{-5}$	$P_b = 10^{-10}$
Релейские замирания ($k^2 = 0$)				
2	22,259271	47,229239	21,831636	46,797711
4	11,104341	23,251425	10,860718	22,985694
8	6,382294	11,75277	6,279525	11,625923
Райсовские замирания ($k^2 = 10$)				
2	7,60747	42,069467	7,33501	41,361792
4	4,271147	8,419363	4,225982	8,248689
8	3,527448	4,429917	3,512034	4,405172

Результаты расчета вероятности битовой ошибки при временном разнесении

Используя формулу для вероятности средней битовой ошибки при разнесенном приеме сигналов КАМ-M и общих замираниях Райса — Накагами

$$P_b = \frac{2}{K} \sum_{j=1}^{\sqrt{M}-1} a_{2j-1} H_L \left(\sqrt{L} \sqrt{\frac{2k^2 g_{2j-1} \gamma_{bc}}{g_{2j-1} \gamma_{bc} + L^\lambda (k^2 + 1)}}, \sqrt{\frac{g_{2j-1} \gamma_{bc}}{g_{2j-1} \gamma_{bc} + L^\lambda (k^2 + 1)}}, \infty \right),$$

рассмотрим влияние временного разнесенного приема на помехоустойчивость системы связи.



■ **Рис. 2.** Зависимость $P_b(L, \lambda)$ при передаче сигналов КАМ-16 (а) и КАМ-64 (б), замираниях Райса ($k^2 = 10$) и временном разнесении ($\lambda = 1$)

■ **Таблица 2.** Расчет коэффициента $\sigma_{\text{порог}}$ для различных L при передаче сигналов КАМ-64 в канале связи с глубокими райсовскими замираниями ($k^2 = 10$) и временным разнесением

γ_{bc} , дБ	$\sigma_{\text{порог}}$						
	$L = 2$	$L = 4$	$L = 6$	$L = 8$	$L = 12$	$L = 15$	$L = 20$
12	0,911475	0,970946	0,985743	0,991559	0,996046	0,997415	0,998514
14	0,827126	0,939192	0,969465	0,981715	0,991341	0,994314	0,996718
16	0,680062	0,874028	0,934203	0,95983	0,980616	0,987179	0,992547
18	0,580773	0,821557	0,904073	0,940589	0,970928	0,980667	0,988703

Зависимости вероятности средней битовой ошибки от количества ветвей при временном разнесении ($\lambda = 1$) представлены на рис. 2, а, б. Для такого вида разнесения найти оптимальное число ветвей (по критерию минимума вероятности средней битовой ошибки) невозможно, так как вероятность ошибки имеет монотонно убывающий характер и при $L \rightarrow \infty$ асимптотически стремится к вероятности ошибки в канале с АБГШ. Однако в этом случае можно ввести понятие рационального числа ветвей разнесения L_{ratio} . Для определения конкретного значения рационального числа ветвей предполагаем, что увеличение числа ветвей сверх этого значения ведет лишь к незначительному повышению помехоустойчивости, а степень повышения помехоустойчивости задается исследователями. Так, например, для сигналов КАМ-64 в табл. 2 представлен расчет степени повышения помехоустойчивости, характеризуемой отношением вероятностей ошибок, т. е. минимальной величиной $\sigma_{\text{порог}} = P(L + 1, \gamma_{bc})/P(L, \gamma_{bc})$, удовлетворяющей неравенству $\sigma_{\text{порог}} > 1 - \varepsilon$, где $\varepsilon > 0$ — заданная величина.

Анализ результатов, представленных в табл. 2, показывает, что, например, при $\varepsilon = 0,1$ и $\gamma_{bc} = 18$ дБ величина $\sigma_{\text{порог}} = 0,904073$ и, следовательно, $L_{\text{ratio}} = 6$, т. е. можно ограничиться примени-

ем шести ветвей разнесения, и дальнейшее увеличение этого числа будет приводить лишь к незначительному снижению вероятности ошибки. Аналогично можно рассчитать $\sigma_{\text{порог}}$ для других видов сигналов, используемых в современных телекоммуникационных стандартах.

Результаты расчета вероятности битовой ошибки при частотном разнесении, реализованном на одном передатчике

В системе с частотным разнесенным приемом, реализованным на одном передатчике (коэффициент $\lambda = 2$) (рис. 3, а, б), существует оптимальное значение числа ветвей, при котором достигается минимум вероятности битовой ошибки: $L_{\text{opt}} = \arg \min_L P_b(L, \gamma_{bc}^*)$. Ввиду того, что вероятность ошибки имеет один экстремум и переменная L является дискретной величиной, задача определения оптимального числа ветвей может быть решена численными методами.

По графикам видно, что, например, в канале с райсовскими замираниями ($k^2 = 10$) для сигналов КАМ-16 (см. рис. 3, б, слева):

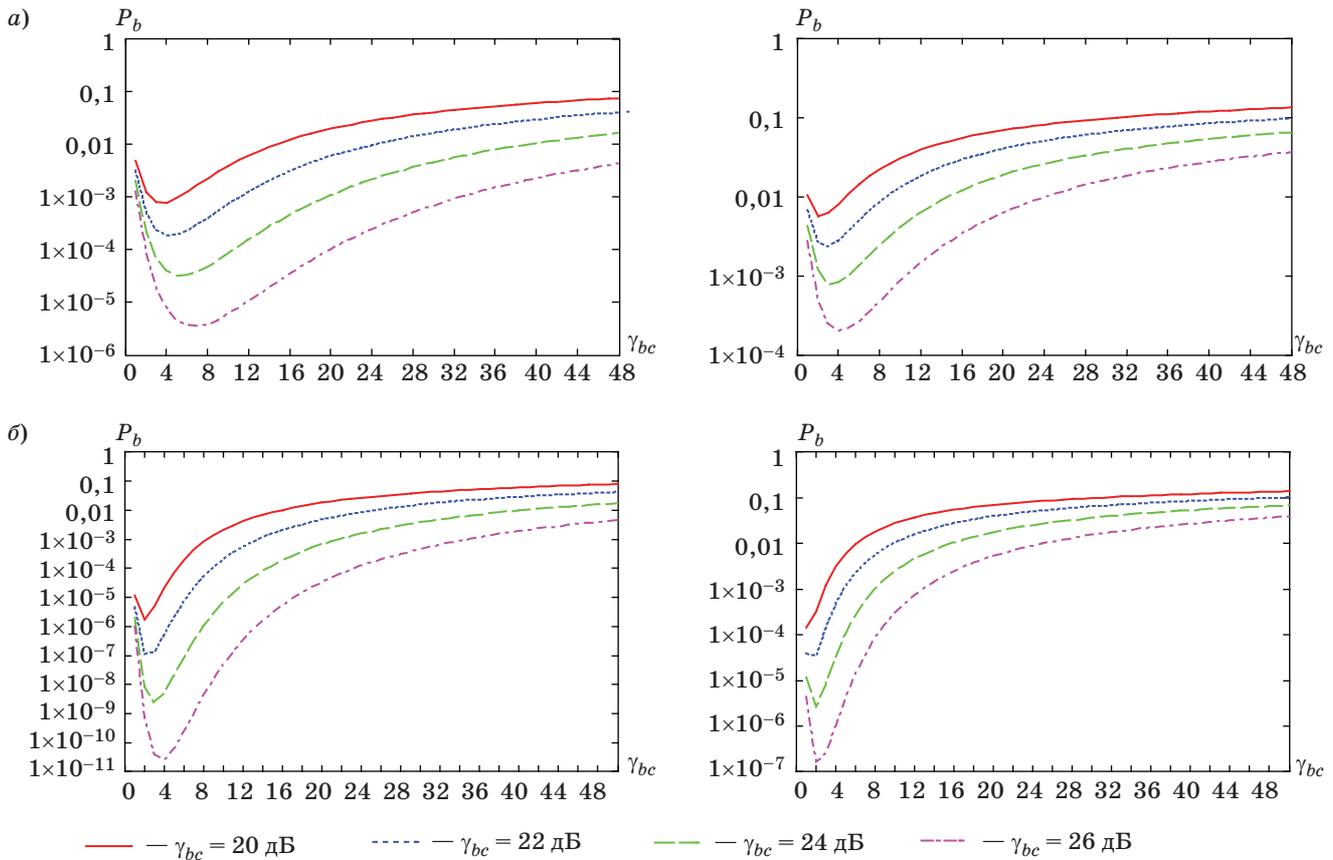
1) при $\gamma_{bc} = 20$ дБ при использовании двух ветвей вероятность битовой ошибки $P_b = 1,69788 \cdot 10^{-6}$, а при трех ветвях $P_b = 4,95217 \cdot 10^{-6}$; при больших

значениях числа ветвей наблюдается снижение помехоустойчивости. Очевидно, что оптимальным будет выбор двух ветвей разнесения. Аналогичная картина для $\gamma_{bc} = 22$ дБ;

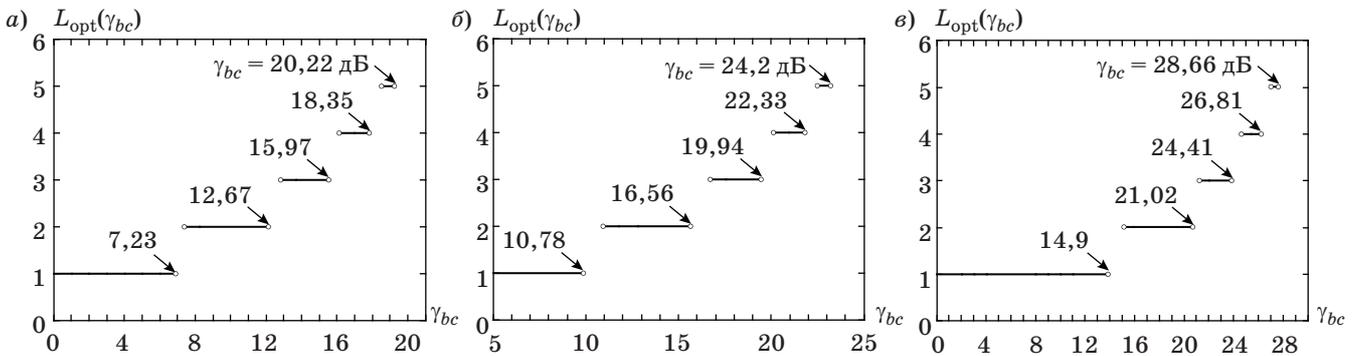
2) при $\gamma_{bc} = 24$ дБ при использовании двух ветвей вероятность битовой ошибки $P_b = 7,49155 \cdot 10^{-9}$, а при трех ветвях $P_b = 2,32279 \cdot 10^{-9}$; при больших значениях числа ветвей наблюдается повышение вероятности ошибки, следовательно, оптимальным будет выбор трех ветвей разнесения;

3) при $\gamma_{bc} = 26$ дБ при использовании трех ветвей вероятность битовой ошибки $P_b = 3,65435 \cdot 10^{-11}$, а при четырех ветвях $P_b = 2,57744 \cdot 10^{-11}$, следовательно, оптимальным (по вероятности битовой ошибки) будет выбор четырех ветвей разнесения, так как при больших значениях наблюдается повышение вероятности ошибки.

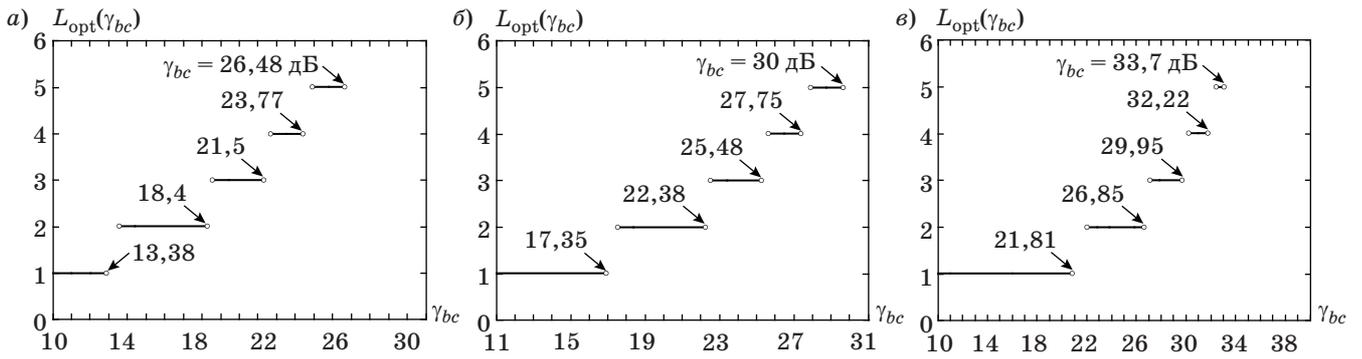
Аналогично рассуждая, можно определить оптимальное количество ветвей разнесения, которое необходимо использовать при передаче сиг-



■ Рис. 3. Зависимость $P_b(L, \lambda)$ при передаче сигналов КАМ-16 (слева) и КАМ-64 (справа) в канале связи с релейским, $k^2 = 0$ (а) и глубокими райсовскими, $k^2 = 10$ (б) замираниями и частотным разнесением при использовании одного передатчика ($\lambda = 2$)



■ Рис. 4. Зависимость $L_{opt}(\gamma_{bc})$ при приеме сигналов КАМ-4 (а), КАМ-16 (б) и КАМ-64 (в) в канале с релейскими замираниями ($k^2 = 0$) и частотном разнесении, реализованном на одном передатчике ($\lambda = 2$)



■ Рис. 5. Зависимость $L_{opt}(\gamma_{bc})$ при приеме сигналов КАМ-4 (а), КАМ-16 (б) и КАМ-64 (в) в канале с райсовскими замириями ($k^2 = 10$) и частотном разнесении, реализованном на одном передатчике ($\lambda = 2$)

налов КАМ-64 (см. рис. 3, а и б, справа) в канале с релейскими и райсовскими замириями.

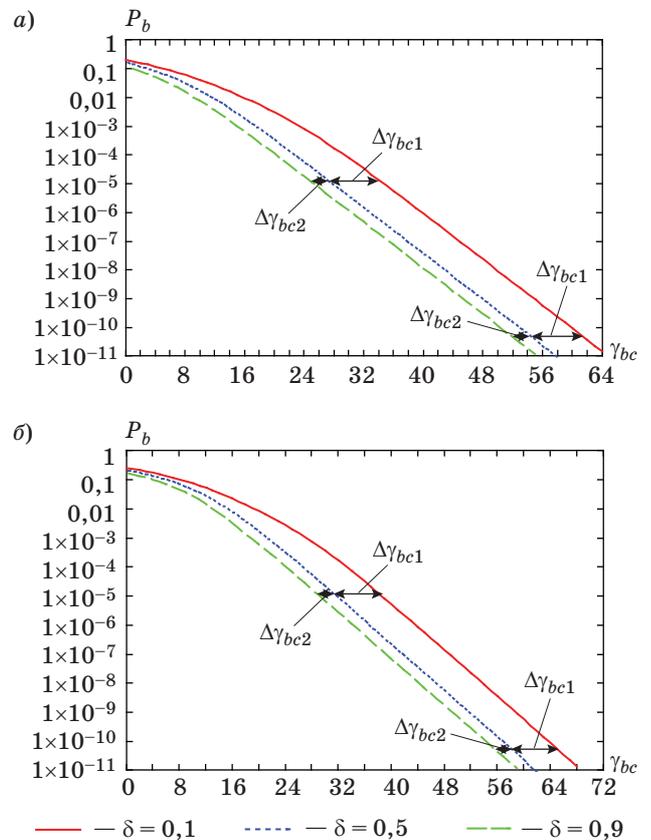
Полезной является зависимость количества ветвей разнесения от отношения сигнал/шум (рис. 4, а-в и 5, а-в), где наглядно можно увидеть, при каком γ_{bc} необходимо увеличивать количество ветвей разнесения, однако данные зависимости не показывают полученную в этом случае вероятность ошибки в канале связи.

Увеличение количества ветвей разнесения может быть связано с повышением стоимости (сложности) аппаратуры связи, что не всегда приемлемо. В зависимости от помеховой ситуации может решаться задача выбора оптимального количества ветвей по критерию минимума вероятности битовой ошибки или рационального количества ветвей, исходя из разумного соотношения необходимой помехоустойчивости, стоимости, массы и др.

Расчет вероятности битовой ошибки для двоянного приема многопозиционных сигналов при различном отношении сигнал/шум γ_{bc} в каждой ветви

Рассмотрим канал связи с релейскими замириями ($k^2 = 0$) при двоянном приеме ($L = 2$), без ограничения общности, полагая, что $\delta^2 = \gamma_1/\gamma_2$. Случай при большем количестве ветвей представляется более сложным для исследования, поэтому ограничимся только двумя ветвями разнесения. Воспользуемся выражением для расчета средней вероятности битовой ошибки [6]

$$P_b = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{1}{1 - \delta^2} \frac{1}{K} \sum_{j=1}^{\sqrt{M}-1} a_{2j-1} \left(\frac{\sqrt{g_{2j-1} \gamma_{bc}}}{\sqrt{g_{2j-1} \gamma_{bc} + 2^\lambda}} - \frac{-\delta^2 \sqrt{g_{2j-1} \gamma_{bc} \delta^2}}{\sqrt{g_{2j-1} \gamma_{bc} \delta^2 + 2^\lambda}} \right) \right)$$



■ Рис. 6. Зависимость $P_b(\gamma_{bc})$ при передаче сигналов КАМ-16 (а) и КАМ-64 (б) и пространственном разнесении на две ветви ($\lambda = 0$)

Как видно из рис. 6, а и б, увеличение параметра δ ведет к повышению помехоустойчивости. Энергетические потери при уменьшении δ можно оценить, предположив, что $\gamma_{bc} \gg 1$ и $\lambda = \text{const}$, тогда

$$\Delta \gamma_{bc} = 10 \lg \gamma_{bc}^* - 10 \lg \gamma_{bc} \approx 10 \lg \frac{\delta^*}{\delta},$$

где $\gamma_{bc}^*(\gamma_{bc})$ — отношение сигнал/шум в первой ветви при выборе параметра $\delta^*(\delta)$. Напри-

мер, если для вероятности битовой ошибки $P_b^* = 10^{-10}$ при разнесенном приеме $\delta^* = 0,9$, то при снижении δ до 0,5 потери будут составлять $\Delta\gamma_{bc2} = 2,55$ дБ, а при снижении δ до 0,1 $\Delta\gamma_{bc2} = 9,54$ дБ. Эти результаты совпадают с полученными по графикам. При снижении δ от 0,9 до 0,5 при передаче сигналов КАМ-16 $\Delta\gamma_{bc2} = 2,5527$ дБ, при снижении δ до 0,1 $\Delta\gamma_{bc1} = 9,5421$ дБ. При передаче сигналов КАМ-64 снижение δ с 0,9 до 0,5 ведет к получению $\Delta\gamma_{bc2} = 2,5527$ дБ, до 0,1 — к $\Delta\gamma_{bc1} = 9,542$ дБ.

Увеличение коэффициента мощности передатчика λ и позиционности передаваемого сигнала M практически не влияет на величину потерь $\Delta\gamma_{bc}$.

Заключение

Получены аналитические соотношения для расчета вероятности ошибки в канале связи с замираниями Райса — Накагами, АБГШ и разнесенным приемом. На основе полученных соотношений проведен численный расчет и определен потенциальный энергетический выигрыш от ис-

пользования пространственного разнесенного приема сигналов КАМ-16 и КАМ-64.

Проведенные исследования показали, что в каналах связи для различных видов разнесения может решаться задача оптимального или рационального выбора количества ветвей.

Так, для разнесения по частоте при использовании одного передатчика можно найти оптимальное число ветвей разнесения по критерию минимума вероятности средней битовой ошибки.

В свою очередь, для временного разнесения выбор оптимального количества ветвей невозможен, поэтому здесь используется понятие рационального количества ветвей.

При использовании разнесенного приема выбор количества ветвей может производиться в зависимости от тех требований, которые предъявляются к системе связи.

Если канал связи неоднородный, то при сдвоенном пространственном разнесенном приеме величина энергетических потерь, связанная с тем, что в разных ветвях отношение сигнал/шум различное, практически не зависит от позиционности используемых сигналов.

Литература

1. Кловский Д. Д. Передача дискретных сообщений по радиоканалам. — М.: Радио и связь, 1982. — 362 с.
2. Simon K., Alouini M.-S. Digital Communication over Fading Channels: A Unified Approach to Performance Analysis. — N. Y.: John Wiley&Sons, 2000. — 544 p.
3. Савищенко Н. В. и др. Расчет вероятности битовой и символьной ошибок для канала связи, при приеме сигнальных конструкций стандарта DVB-S2/Н. В. Савищенко, О. А. Остроумов, В. С. Кириллов, Д. Д. Капралов, И. Н. Африкантов // Информация и Космос. 2015. № 1. С. 9–15.
4. Бураченко Д. Л., Савищенко Н. В. Геометрические модели сигнально-кодовых конструкций. — СПб.: Военная академия связи, 2012. — 388 с.
5. Андронов И. С., Финк Л. М. Передача дискретных сообщений по параллельным каналам. — М.: Сов. радио, 1971. — 408 с.
6. Savischenko Nikolay V. Special Integral Functions Used in Wireless Communications Theory. — Singapore: World Scientific Publishing Company, 2014. — 600 p.
7. Brychkov Yu. A., Savischenko N. V. A Special Function of Communication Theory // Integral Transforms and Special Functions. 2015. N 26(6). P. 470–484.

UDC 621.39

doi:10.15217/issn1684-8853.2015.6.71

Calculation of Optimal and Reasonable Number of Diversity Branches in Communication Channels with Additive White Gaussian Noise and Common Rice – Nakagami Fading

Savischenko N. V.^a, Dr. Sc., Tech., Professor, snikaspb@mail.ru

Ostroumov O. A.^a, Post-Graduate Student, oleg-26stav@mail.ru

^aS. M. Budenny Military Academy of Communication, 3, Tikhoretskii Pr., 190064, Saint-Petersburg, Russian Federation

Purpose: Real communication channels usually have common frequency nonselective fading, traditionally described by means of the mathematical models by Rice, Rayleigh and Nakagami. Diversity reception (combining signals sent over L independent communication channels with fading) is now widely used to diminish the influence of fading. The purpose of this work is estimating the noise immunity in a communication channel with fading when using diversity reception of multiposition signals and choosing the optimal or reasonable amount of the diversity branches using different kinds of diversity. **Results:** A mathematical model is discussed for a communication channel with common fading and white Gaussian noise. Precise formulas are proposed to calculate the average bit error probability for QAM-M and PSK-M signals using various kinds of diversity reception and coherent reception. The paper contains the calculation of the energy gain from using various kinds of diversity reception of QAM-M signals for a homogeneous communication channel, along with

the calculation of the average bit error probability for an unhomogeneous channel using the space diversity in two channels. It is shown that when $\text{SNR } \gamma_{bc} \gg 1$ is large, the energy losses actually do not depend on the effectiveness coefficient λ of the transmitter power or on the usage of M signals. **Practical relevance:** The proposed techniques of choosing the optimal and reasonable amount of branches for various kinds of diversity reception of multiposition signals by minimum average bit error criterion with a fixed SNR can be used for developing automatic branch choice facilities in communication systems with diversity reception.

Keywords — Diversity Reception, Noise Immunity, Multiposition Signals, Bit (Symbol) Error Probability.

References

1. Klovsij D. D. *The Transmission of the Discrete Messages in Radio Channels*. Moscow, Radio i svjaz' Publ., 1982. 362 p. (In Russian).
2. Simon K., Alouini M.-S. *Digital Communication over Fading Channels: A Unified Approach to Performance Analysis*. New York, John Wiley&Sons, 2000. 544 p.
3. Savischenko N. V., Ostroumov O. A., Kirillov V. S., Kapralov D. D., Afrikantov I. N. The Calculation of the Bit and Symbol Errors Possibility for the Communication Channel During DVB-S2 Standard Signal Constructions. *Informatsiia i Kosmos*, 2015, no. 1, pp. 9–15 (In Russian).
4. Byrachenko D. L., Savischenko N. V. *Geometricheskie modeli signal'no-kodovykh konstruksii* [The Geometric Models of the Signal-code Constructions]. Saint-Petersburg, S. M. Budenny Military Academy of Communication Publ., 2012. 388 p. (In Russian).
5. Andronov I. S., Fink L. M. *Peredacha diskretnykh soobshchenii po parallel'nym kanalam* [The Transmission of the Discrete Messages in Paralleled Channels]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1971. 408 p. (In Russian).
6. Savischenko Nikolay V. *Special Integral Functions Used in Wireless Communications Theory*. Singapore: World Scientific Publishing Company, 2014. 600 p.
7. Brychkov Yu. A., Savischenko N. V. A Special Function of Communication Theory. *Integral Transforms and Special Functions*, 2015, no. 26(6), pp. 470–484.

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.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ МНОГОПОЗИЦИОННОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

И. С. Ашурков^а, адъюнкт

В. В. Какаев^б, канд. техн. наук, доцент

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

^аВысшее военное училище ПВО, Ярославль, РФ

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

Введение: применение многопозиционных радиолокационных систем требует наилучшего, с точки зрения достижения заданных значений показателей качества, взаимного расположения их элементов. Для решения этой задачи необходимо оптимизировать пространственную структуру системы, предварительно определив и задав критерий оптимальности. **Цель:** поиск оптимального варианта размещения элементов многопозиционной радиолокационной системы с некооперируемым источником подсвета, который обладает наилучшим значением показателя качества из заданного конечного количества вариантов пространственной структуры. **Результаты:** методом полного перебора получен алгоритм оптимизации пространственной структуры многопозиционной радиолокационной станции. Определено количество вариантов и получены результаты оптимизации пространственной структуры многопозиционной радиолокационной системы с некооперируемым источником подсвета и двумя приемными позициями. При этом определены точки местоположения приемных пунктов, обеспечивающие максимальное значение целевой функции — площади сечения рабочей зоны при заданных ограничениях и для различных высот полета целей. Эффективность использования алгоритма оценена значением коэффициента увеличения площади рабочей зоны.

Ключевые слова — многопозиционная радиолокационная система, некооперируемый источник подсвета, метод полного перебора.

Введение

Применение многопозиционных радиолокационных систем (МП РЛС) связано с необходимостью обеспечить взаимное месторасположение их элементов, позволяющее реализовать наилучшие потенциальные возможности по обнаружению и измерению координат целей. Область пространства, в пределах которой обеспечивается обнаружение объектов с вероятностью D не ниже заданной и измерение их координат с требуемой точностью σ_α , называют рабочей зоной [1]:

$$\Omega_{p,z} = \Omega_{z,o} \cap \Omega_{z,m}, \quad (1)$$

где $\Omega_{z,o} = \{X, Y, Z \mid D \geq D_{\text{тр}}\}$ — зона обнаружения; $\Omega_{z,m} = \{X, Y, Z \mid \sigma_\alpha \leq \sigma_{\text{доп}}\}$ — зона местопределения; $X \in \{X_{\text{min}}; X_{\text{max}}\}$, $Y \in \{Y_{\text{min}}; Y_{\text{max}}\}$, $Z \in \{Z_{\text{min}}; Z_{\text{max}}\}$ — области определения соответствующих декартовых прямоугольных координат, в совокупности задающие область анализа R^a , т. е. $\{X, Y, Z\} \in R^a$.

В системах с кооперируемыми источниками подсвета задача определения пространственной структуры, т. е. местоположения элементов, может быть решена на этапе ее синтеза. Особенностью применения систем с некооперируемыми источниками подсвета является априорная неопределенность местоположения и состояния передатчиков, которая преодолевается непосредственно в ходе применения системы. Поэтому

всякий раз при изменении точки или зоны расположения источника подсвета должен проводиться анализ рабочей зоны системы и последующий выбор пространственного размещения N приемных пунктов.

Под оптимизацией пространственной структуры МП РЛС будем понимать поиск p^* — дискретного варианта размещения элементов МП РЛС с некооперируемым источником подсвета, который обладает наилучшим значением показателя качества из заданного конечного количества вариантов $\mathbf{P} = \{p_1, p_2, \dots, p_M\}$, $\mathbf{P} \in R^a$. При этом под вариантом размещения p_i , $i = 1, \dots, M$, понимается совокупность векторов пространственных координат приемных пунктов системы $\mathbf{X}_\Pi = |x_{\Pi 1}, x_{\Pi 2}, \dots, x_{\Pi N}|$, $\mathbf{Y}_\Pi = |y_{\Pi 1}, y_{\Pi 2}, \dots, y_{\Pi N}|$, $\mathbf{Z}_\Pi = |z_{\Pi 1}, z_{\Pi 2}, \dots, z_{\Pi N}|$, а показателем качества выступает площадь сечения рабочей зоны $S_{\Omega_{p,z}}$ на высоте полета h_Π цели.

Целевая функция для решаемой задачи примет вид

$$S_{\Omega_{p,z}} = F(\mathbf{X}_\Pi, \mathbf{Y}_\Pi, \mathbf{Z}_\Pi). \quad (2)$$

В качестве критерия оптимизации будем использовать максимум площади рабочей зоны

$$S_{\Omega_{p,z}} = \max \quad (3)$$

при заданных ограничениях.

1. Расстояние между приемными пунктами должно быть не менее b_{min} и не более b_{max} (опре-

деляемое, например, дальностью прямой видимости) базового значения:

$$b_{\min} \leq b_{ij} \leq b_{\max};$$

$$b_{ij} = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2 + (z_j - z_i)^2},$$

$$i, j = 1, \dots, N, \quad (4)$$

где b_{ij} — базовое расстояние между приемными пунктами в МП РЛС; i, j — номера приемных пунктов.

2. Область расположения приемных пунктов $R^{п.п} \in R^a$ отделена от области, в которой задана траектория движения источника подсвета $R^{и.п} \in R^a$ поверхностью, проходящей через кривую на плоскости X, Y (например, линию границы или рубежа боевого соприкосновения), причем область анализа является объединением областей $R^a = R^{п.п} \cup R^{и.п}$.

3. Требуемая вероятность обнаружения и допустимая точность измерения координат объекта задаются, исходя из требований, предъявляемых к системе:

$$D_{\text{тр}} \in \{D_{\min}; D_{\max}\};$$

$$\sigma_{\text{доп}} \in \{0; \sigma_{\max}\}, \quad (5)$$

где $D_{\text{тр}}$ — требуемое значение вероятности правильного обнаружения объекта; $\sigma_{\text{доп}}$ — допустимое значение среднеквадратической ошибки определения местоположения объекта.

Для определения вида целевой функции воспользуемся криволинейным интегралом по замкнутому контуру, называемому циркуляцией [2, 3]:

$$S_{\Omega_{п.з}} = \frac{1}{2} \oint_{\Omega_{п.з} | h_{ц} = \text{const}} (xdy - ydx), \quad (6)$$

где $\Omega_{п.з} | h_{ц} = \text{const}$ — граница сечения рабочей зоны плоскостью $h_{ц}$, обходимая против часовой стрелки.

Порядок определения зон обнаружения и местоопределения $\Omega_{з.о}$ и $\Omega_{з.м}$, пересечением которых является рабочая зона (1), рассмотрен в работах [4–6].

Алгоритм оптимизации пространственной структуры МП РЛС

Для поиска глобального условного экстремума целевой функции воспользуемся методом полного перебора как наиболее простым для реализации и гарантирующим, что будет найден наилучший результат. При его использовании определяется значение целевой функции для всех возможных вариантов размещения приемных пунктов и выбирается наилучший в соответствии с заданным критерием.

Представим зону анализа в виде дискретного множества — трехмерной координатной матрицы ССС [7], содержащей $L = n \times m \times k$ элементов (n — по оси X , m — по оси Y , k — по оси Z) (рис. 1). Элементы матрицы являются узлами координатной сетки зоны анализа, а интервал Δ между ними при заданных линейных размерах зоны анализа определяет количество элементов, что влияет на точность решаемых задач.

Задаваясь значением высоты полета объекта $h_{ц} = z_i$, $i = \{1, 2, \dots, k\}$, для которой проводится анализ рабочей зоны, получим сечение трехмерной координатной матрицы, представляющее собой двумерную матрицу

$$CC = \begin{vmatrix} x_1 y_1 z_k & x_2 y_1 z_k & \dots & x_n y_1 z_k \\ x_1 y_2 z_k & x_2 y_2 z_k & \dots & x_n y_2 z_k \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_1 y_m z_k & x_2 y_m z_k & \dots & x_n y_m z_k \end{vmatrix}, \quad (7)$$

элементы которой можно представить в виде вектора координат, записав их последовательно по столбцам:

$$C = |c_{11}, c_{12}, \dots, c_{1m}, c_{21}, \dots, c_{2m}, \dots, c_{nm}| = |c_s|,$$

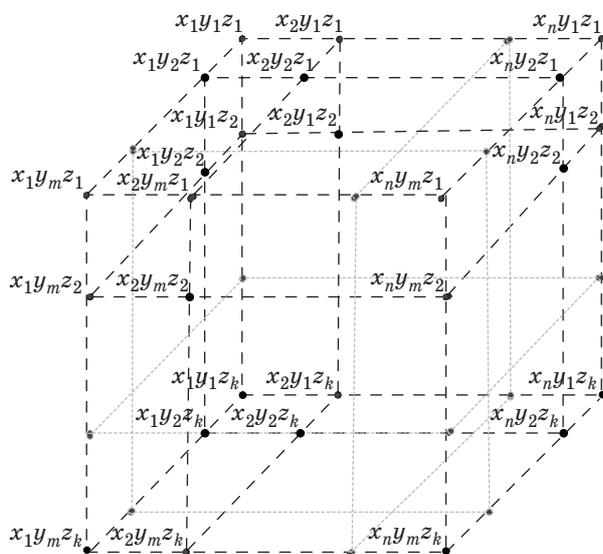
$$s = 1, 2, \dots, L. \quad (8)$$

Значения элементов вектора координат принадлежат области анализа

$$C \in R^a. \quad (9)$$

Поскольку приемные пункты инвариантны, то общее количество вариантов пространственной структуры МП РЛС можно представить как сочетание L элементов по N [3]:

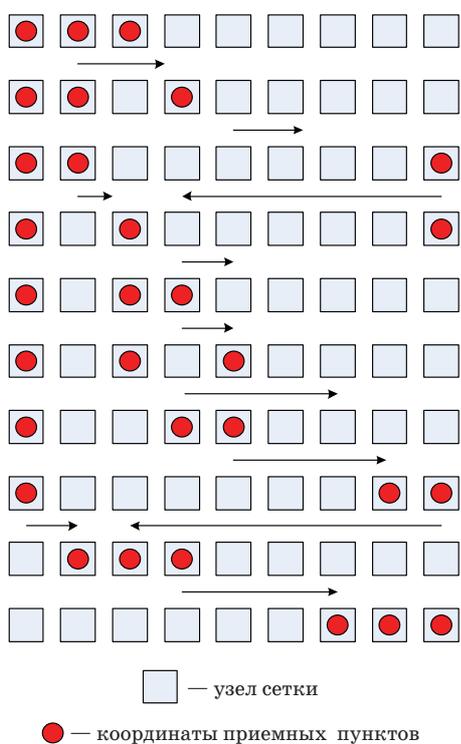
$$Q = \frac{L!}{N!(L-N)!}. \quad (10)$$



■ Рис. 1. Вид трехмерной координатной матрицы

Для оценки значения целевой функции в каждом из Q вариантов пространственной структуры МП РЛС разработан алгоритм, пример реализации десяти итераций которого при $N = 3, L = 9$ представлен на рис. 2.

После расчета всех значений целевой функции определяется результат, соответствующий ее максимальному значению $S_{\Omega_{p,3}, \max} = \max(S_{\Omega_{p,3-1}}, S_{\Omega_{p,3-2}}, \dots, S_{\Omega_{p,3-M}})$. Вариант пространственного размещения элементов МП РЛС при этом будет являться оптимальным p^* по заданному критерию (3), а размещение приемных позиций в точках с координатами, соответствующими этому варианту, позволит в полной мере



■ Рис. 2. Иллюстрация реализации алгоритма полного перебора

реализовать потенциальные пространственные и точностные возможности МП РЛС.

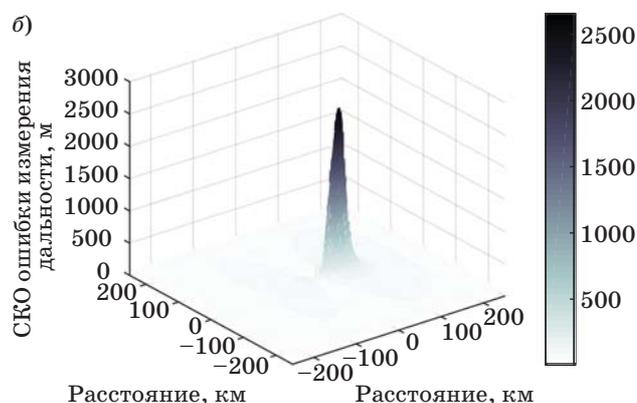
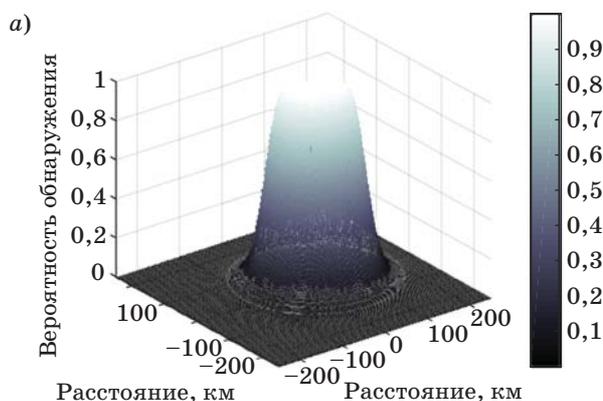
На рис. 3, а показана поверхность распределения вероятности правильного обнаружения, соответствующая зоне обнаружения, а на рис. 3, б — поверхность распределения потенциально достижимой точности измерения дальности, соответствующая зоне местоопределения для двух приемных пунктов, размещенных на местности произвольно.

Результаты оптимизации пространственной структуры МП РЛС из одной передающей и двух приемных позиций приведены в таблице. Область анализа составляет 500×500 км; дискретность сетки Δ составляет 10 км; порог по вероятности — 0,9; по точности — 1,5 км.

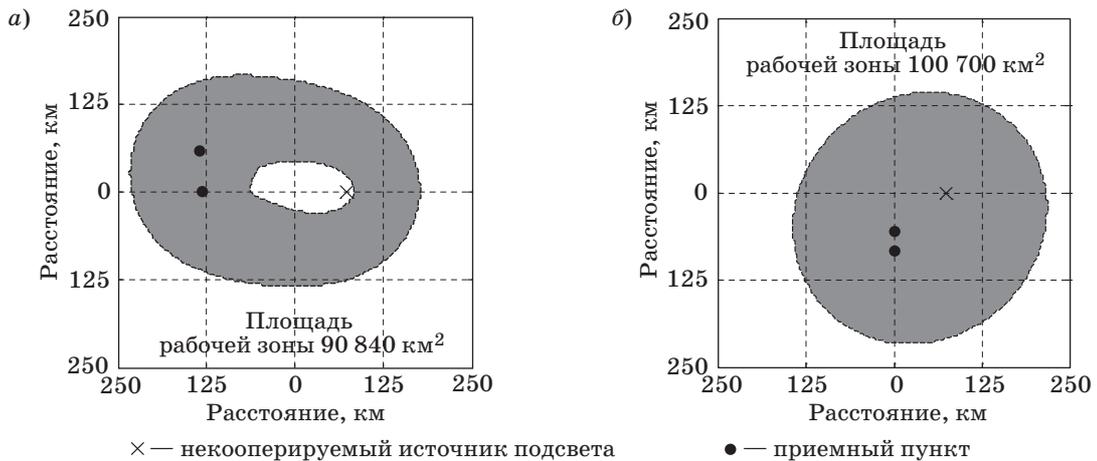
Анализ результатов свидетельствует о необходимости учета высоты обнаруживаемых объектов при определении точек местоположения элементов МП РЛС. Так, например, при обнаружении объектов на высоте 1000, 20 000, 50 000 м различны не только оптимальные значения целевой функции, но и точки расположения приемных пунктов (см. таблицу).

■ Результаты оптимизации пространственного местоположения методом полного перебора

Номер приемного пункта	Максимальное количество итераций	Оптимальные координаты приемных пунктов, м		Высота воздушного объекта, м	Площадь сечения, км ²
		X^*	Y^*		
1	25 200	0	-85 714	1000	100 700
2		0	-57 143		
1	25 200	-57 143	-28 571	20 000	99 140
2		-28 571	-28 571		
1	25 200	-57 143	0	50 000	94 640
2		-28 571	0		



■ Рис. 3. Поверхность вероятности правильного обнаружения (а) и точности местоопределения (б)



■ **Рис. 4.** Сечение рабочей зоны МП РЛС при неоптимизированном (а) и оптимизированном (б) размещении приемных позиций

Сечение рабочей зоны при произвольном (неоптимизированном) размещении приемных позиций и $h_{ц} = 1000$ м показано на рис. 4, а, результат решения оптимизационной задачи представлен на рис. 4, б.

Оценивая эффект оптимизации пространственной структуры коэффициентом увеличения площади рабочей зоны

$$K_{S_{\Omega_{p.з}}} = \frac{S_{\Omega_{p.з}}^*}{S_{\Omega_{p.з}}} \cdot 100\%, \quad (11)$$

где $S_{\Omega_{p.з}}^*$ — оптимальное значение целевой функции, можно показать, что для рассмотренного примера его значение составляет 10,9 %.

Заключение

Таким образом, получен алгоритм, позволяющий методом перебора конечного количества вариантов пространственной структуры МП РЛС определить вариант, оптимальный по критерию максимума площади рабочей зоны. При размещении приемных позиций в точках, соответствующих оптимальному варианту, МП РЛС обладает наилучшими потенциальными возможностями по обнаружению целей и измерению их координат. Эффективность использования оптимизации можно оценивать значением коэффициента увеличения площади рабочей зоны. Необходимо учитывать, что время вычислений с использованием метода полного перебора возрастает по экспоненциальному закону в зависимости от размерности вектора \mathbf{P} . При невозможности использовать данный метод следует переходить к использованию других методов оптимизации, например методу ветвей и границ, генетическому методу.

Литература

1. Гришин Ю. П., Ипатов В. П., Казаринов Ю. М. Радиотехнические системы / под общ. ред. Ю. М. Казаринова. — М.: Высш. шк., 1990. — 496 с.
2. Батчев С. А., Вакуленко А. А. Оптимизация рабочей зоны многопозиционной радиолокационной системы при ограничениях по области размещения ее элементов // Научные технологии. 2008. № 6. С. 56–58.
3. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. — М.: Наука, 1968. — 720 с.
4. Лешко Н. А., Ашурков И. С. Расчет рабочей зоны многопозиционной радиолокационной системы по стороннему источнику подсвета // Тр. МАИ. 2015. Вып. 83. www.mai.ru/science/trudy/ (дата обращения: 24.10.2015).
5. Ашурков И. С., Лешко Н. А., Цыбульник А. Н. Методика расчета рабочей зоны многопозиционной радиолокационной системы с посторонним источником подсвета // Вопросы оборонной техники. Сер. 16. Технические средства противодействия терроризму. 2015. Вып. 5–6. С. 87–91.
6. Ульянов Г. Н., Павлов И. Н. Локальная система позиционирования объектов вооружения, военной техники и личного состава // Изв. Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2008. № 1. С. 33–39.
7. Елисеев Д. В., Балдин А. В. Алгебра многомерных матриц для обработки адаптируемой модели данных // Наука и образование. 2011. <http://technomag.edu.ru/doc/199561.html> (дата обращения: 20.09.2015).

UDC 621.396

doi:10.15217/issn1684-8853.2015.6.81

Multiposition Radar System Space Structure OptimizationI. S. Ashurkov^a, Post-Graduate Student, ivan_ashurkov@mail.ruV. V. Kakaev^b, PhD, Tech., Associate Professor, kakaev_vv@mail.ruN. A. Leshko^b, PhD, Tech., Associate Professor, nikolai_zru@mail.ru^aHigher Military School of Air Defense, 28, Moskovskii Pr., 150001, Yaroslavl, Russian Federation^bA. F. Mozhaiskii Military Space Academy, 13, Zhdanovskaia St., 197198, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: Multiposition radar systems demand that their elements are arranged optimally from the viewpoint of the desired quality parameters. To solve this problem, the space structure of the system should be optimized, with the optimality criterion preliminarily defined. **Purpose:** This study searches for the optimal arrangement of elements in a multiposition radar system with an uncooperative illumination source, which would have the best quality parameter value among several options for the space structure. **Results:** Full enumeration method helped to obtain an algorithm of space structure optimization for a multiposition radar system. The number of variants was specified, and the space structure was optimized for a multiposition radar system with an uncooperative illumination source and two receiving stations. The location points of the receiving stations were specified, providing the maximum value of the target function which was the cross section of the working zone with preset limits for different heights of the target flight. The algorithm efficiency is assessed by the value of the working zone increase coefficient.

Keywords — Multiposition Radar System, Uncooperative Illumination Source, Full Enumeration Method.

References

1. Grischin Y. P., Ipatov V. P., Kazarinov Y. M. *Radiotekhnicheskie sistemy* [Radio Engineering Systems]. Moscow, Vysshaia shkola Publ., 1990. 496 p. (In Russian).
2. Batchev S. A., Vakylenko A. A. Optimization of a Working Zone of the Multipositional Radar System with Limitations to the Location of its Elements. *Naukoemkie tekhnologii*, 2008, no. 6, pp. 56–58 (In Russian).
3. Korn G., Korn T. *Spravochnik po matematike dlia nauchnykh rabotnikov i inzhenerov* [Mathematical Handbook for Scientists and Engineers]. Moscow, Nauka Publ., 1968. 720 p. (In Russian).
4. Leshko N. A., Ashurkov I. S. Calculation of Working Zone of Multiposition Radar System by the Exterior Light Source. *Trudy MAI*, 2015, iss. 83. Available at: www.mai.ru/science/trudy/ (accessed 24 October 2015) (In Russian).
5. Ashurkov I. S., Leshko N. A., Cybulnik A. N. Design Procedure of the Working Zone of Multiposition Radar with an Extraneous Source Illumination. *Voprosy oboronnoi tekhniki. Ser. 16. Tekhnicheskie sredstva protivodeistviia terrorizmu*, 2015, vol. 5–6, pp. 87–91 (In Russian).
6. Ulyanov G. N., Pavlov I. N. Local Positioning System of Objects Weapons, Military Equipment and Personnel. *Izvestiia Rossiiskoi akademii raketnykh i artilleriiskikh nauk*, 2008, no. 1, pp. 33–39 (In Russian).
7. Eliseev D. V., Baldin A. V. Multidimensional Matrix Algebra to Handle Adaptable Data Model. *Nauka i obrazovanie*, 2011. Available at: <http://technomag.edu.ru/doc/199561.html> (accessed 20 September 2015) (In Russian).

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АВТОНОМНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ВЫСОКОТОЧНОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ПЕШЕХОДА НА МЕСТНОСТИ

А. Ю. Каплин^а, канд. техн. наук

М. Г. Степанов^а, доктор техн. наук, профессор

^аОАО «Радиоавионика», Санкт-Петербург, РФ

Постановка проблемы: в настоящее время для определения координат человека на плоскости используется автономная навигационная система, куда входят трехосевой акселерометр и трехосевой гироскоп. Недостатком данной системы является накопление со временем ошибки информации, поступающей от составляющих системы за счет неучтенных систематических погрешностей. Эту ошибку невозможно компенсировать без дополнительного внешнего источника информации. **Цель:** исследовать возможность адаптации алгоритмов обработки инерциальной системы определения координат с использованием данных от внешнего источника и разработать алгоритм комплексирования информации в целях компенсации ошибок при позиционировании человека на местности. **Результаты:** показана возможность и предложен метод комплексирования информации от автономной инерциальной навигационной системы и внешнего независимого источника информации, в качестве которой выступает информационный сигнал от биомеханической модели движения пешехода. Метод представлен в виде двух алгоритмов. Первый алгоритм реализован в виде разомкнутой схемы, при котором структура инерциальной системы не меняется; второй — в виде замкнутой схемы с обратной связью, при этом структура инерциальной системы меняется, однако она более устойчива к изменению предположений, принятых при синтезе предложенных алгоритмов. **Практическая значимость:** высокоточное определение координат человека на местности необходимо во многих ситуациях, в частности, при проведении спасательных работ сотрудниками МЧС.

Ключевые слова — автономная навигация, инерциальная навигационная система, фильтр Калмана, акселерометр, гироскоп.

Введение

Система определения координат человека на местности реализуется в виде модуля автономной навигации (МАН), который крепится на талии или торсе человека. В своей основе МАН строится как бесплатформенная инерциальная навигационная система (ИНС), реализующая счисление скорости и ее коррекцию от источника внешней информации. МАН состоит из 1) канала определения скорости и текущих координат человека и 2) угломерного азимутального канала.

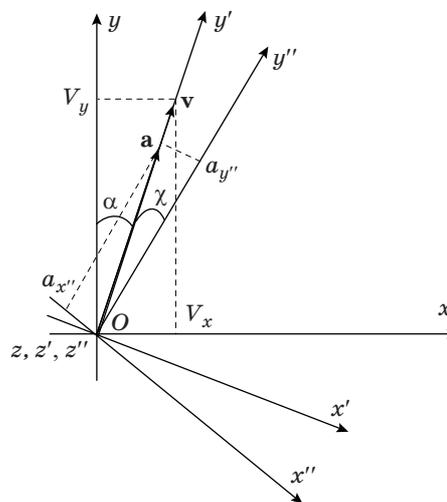
В канал скорости и текущих координат входят: инерциальная навигационная система, в составе которой имеется трехосевой акселерометр и трехосевой гироскоп; вычислитель, реализующий алгоритмы работы МАН; внешний источник информации — биомеханическая модель движения пешехода. В угломерном канале используется тот же трехосевой акселерометр, датчик угловой скорости и трехосевой магнитометр. В работе рассматривается канал определения скорости и текущих координат, при этом используются данные об азимуте, получаемые из угломерного канала.

Система координат МАН

В модуле автономной навигации используются три системы координат (рис. 1).

1. Система *Oxyz* — местная географическая система координат с началом в центре масс МАН. Оси *Ox* и *Oy* лежат в плоскости местного горизонта, причем ось *Ox* направлена на восток, а ось *Oy* — на север. Ось *Oz* совпадает с местной вертикалью. В этой системе координат представляется конечное решение задачи навигации человека.

2. Связанная система координат, соответствующая номинальному (горизонтальному) положению ИНС в отсутствие возмущений по азимуту α



■ Рис. 1. Системы координат модуля автономной навигации

и углам горизонтального наклона (идеальная ИНС). Ось Oy' системы совпадает с направлением движения. Данная система координат предполагает, что горизонтальное положение обеспечивается точным пересчетом (компенсацией горизонтальных углов наклона) данных акселерометра по угловым скоростям $\omega_{x'}$ и $\omega_{y'}$, измеряемым датчиком угловой скорости.

3. $Ox''y''z''$ — возмущенная по азимуту связанная система координат, положение горизонтальных осей Ox'' , Oy'' которой отличается от осей Ox' , Oy' на угол χ в силу «виляющей» походки человека, «болтания» корпуса МАН на его теле и других причин. Угол χ определяется по измерениям угловой скорости ω_z датчиком угловой скорости. Оси чувствительности акселерометра и датчика угловой скорости совпадают с соответствующими осями системы $Ox''y''z''$.

Алгоритм работы идеальной ИНС. Анализ погрешностей реальной ИНС

Рассмотрим сначала работу идеальной ИНС, которая описывается известными базовыми соотношениями. При невозмущенном по азимуту движении ($\chi = 0$) проекции кажущегося ускорения $a(t)$, фиксируемые горизонтальными осями акселерометра, равны $a_{x'}(t) = 0$, $a_{y'}(t) = a(t)$ (см. рис. 1). В дальнейшем, для сокращения записи, зависимость от времени t , где это возможно, опустим.

При возмущенном движении акселерометр фиксирует проекции $a_{x''} = a \sin \chi$, $a_{y''} = a \cos \chi$, которые при известном χ легко приводятся к a :

$$a = a_{x''} \sin \chi + a_{y''} \cos \chi. \quad (1)$$

По измеренному ускорению a путем интегрирования (первый интегратор ИНС) определяется текущая скорость в момент t

$$V(t) = \int_{t_0}^t a(r) dr, \quad (2)$$

где t_0 — начальный момент движения.

По известным скорости V и азимуту α можно вычислить географические компоненты $V_x = V \sin \alpha$, $V_y = V \cos \alpha$, повторное интегрирование которых (второй интегратор ИНС) дает искомые текущие координаты

$$x(t) = \int_{t_0}^t V_x(r) dr; \quad y(t) = \int_{t_0}^t V_y(r) dr. \quad (3)$$

В современных быстродействующих цифровых ИНС интегрирование в (2) и (3) достаточно точно выполняется суммированием дискретных данных.

В реальных ИНС прямое использование соотношений (2) и (3) без дополнительных мер по обе-

спечению приемлемой точности может привести к неудовлетворительным результатам. Это вызвано рядом причин, в частности, ростом со временем ошибок определения скорости и угловой ориентации объекта навигации из-за интегрирования составляющих измерений, обусловленных неучтенными систематическими погрешностями.

В научной литературе по инерциальной навигации и оптимальной фильтрации содержится подробный анализ погрешностей наземных и околоземных ИНС различных типов [1–3]. Применительно к рассматриваемой пешеходной ИНС анализ показывает [4], что при скорости 5–7 км/ч и продолжительности движения около 1–1,5 ч наиболее значимыми являются медленно меняющиеся погрешности δV_x , δV_y компонентов вычисляемых скоростей V_x , V_y , связанные с ошибками горизонтирования β_x , β_y (остаточными, не скомпенсированными углами горизонтальных наклонов), проекциями смещений нулей акселерометров B_x , B_y и дрейфов гироскопов ε_x , ε_y . Погрешности δV_x , δV_y также вызываются такими систематическими факторами, как неточность масштабных коэффициентов, неточный учет кориолисова ускорения, несоосность чувствительных и строительных осей инерциальных датчиков и др.

Для рассматриваемых условий к погрешностям ИНС применим метод аппроксимации погрешностей колебаниями на частоте Шулера (период колебаний 84,4 мин) [2]. При этом подходе погрешности моделируются дифференциальными уравнениями [4, 5]

$$\begin{aligned} \delta \dot{V}_x &= -g\beta_y + B_x; \quad \dot{\beta}_y = \frac{\delta V_x}{R} + \varepsilon_y; \\ \delta \dot{V}_y &= g\beta_x + B_y; \quad \dot{\beta}_x = -\frac{\delta V_y}{R} + \varepsilon_x, \end{aligned} \quad (4)$$

где g — ускорение силы тяжести; R — радиус Земли.

Заметим, что при сделанных допущениях горизонтальные каналы компонентов V_x , V_y и вертикальный канал (используется далее) никак не связаны, и их данные могут обрабатываться независимо и раздельно друг от друга. Ниже, для конкретности, рассматривается канал компонента V_x . Обработка данных в канале V_y ведется аналогично.

От уравнений (4) перейдем к матричному уравнению состояния (формирующего фильтра)

$$\begin{pmatrix} \delta \dot{V}_x \\ \dot{\beta}_y \\ \dot{\varepsilon}_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -g & 0 \\ \frac{1}{R} & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta V_x \\ \beta_y \\ \varepsilon_y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} w_a \\ 0 \\ w_\varepsilon \end{pmatrix}, \quad (5)$$

где w_a , w_ε — шумы системы (шумы инерциальных датчиков).

В выражении (5) учтено, что для пешеходных ИНС смещение нуля акселерометра B_x имеет меньшее значение, чем остальные погрешности. Поэтому без потери строгости рассмотрения вклад B_x включен в величину δV_x .

Переходя в (5) к векторно-матричной форме, получим

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{F} \cdot \mathbf{x}(t) + \mathbf{w}(t), \quad (6)$$

где $\mathbf{x}(t) = [\delta V_x(t), \beta_y(t), \varepsilon_y(t)]^T$ — вектор состояния; $\mathbf{w}(t) = [w_a(t), 0, w_\varepsilon(t)]^T$ — вектор шумов системы;

$$\mathbf{F} = \begin{pmatrix} 0 & -g & 0 \\ \frac{1}{R} & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \text{ — матрица состояния.}$$

Дискретный аналог уравнения состояния (6) имеет вид

$$\mathbf{x}(t_k) = \Phi(t_k, t_{k-1}) \cdot \mathbf{x}(t_{k-1}) + \mathbf{w}(t_{k-1}), k = 1, 2, \dots, \quad (7)$$

где $\mathbf{x}(t_k) = [\delta V_x(t_k), \beta_y(t_k), \varepsilon_y(t_k)]^T$;

$$\mathbf{w}(t_k) = [w_a(t_k), 0, w_\varepsilon(t_k)]^T;$$

$$\Phi(t_k, t_{k-1}) = \begin{pmatrix} 1 & -gT_k & 0 \\ \frac{T_k}{R} & 1 & T_k \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \text{ — переходная матрица,}$$

$T_k = t_k - t_{k-1}$ — шаг во времени.

Считается, что ковариационная матрица $\mathbf{Q}(t_k) = M[\mathbf{w}(t_k) \cdot \mathbf{w}^T(t_k)]$ шумов системы (7) постоянна во времени, равна

$$\mathbf{Q}(t_k) = \mathbf{Q} = \begin{pmatrix} \sigma_a^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_\varepsilon^2 \end{pmatrix}$$

и определяется известными дисперсиями $\sigma_a^2, \sigma_\varepsilon^2$ шумовых составляющих погрешностей инерциальных датчиков. Здесь $M[\]$ — знак математического ожидания.

Итак, формируемое ИНС мгновенное значение компонента скорости V_x представляет собой сумму $V_x^{\text{ИНС}} = V_x + \delta V_x$ истинного (естественно, неизвестного) значения V_x и погрешности δV_x , являющейся первым элементом вектора состояния \mathbf{x} в (6), (7).

Аналогичное представление $V_y^{\text{ИНС}} = V_y + \delta V_y$

$$\mathbf{F} = \begin{pmatrix} 0 & g & 0 \\ -\frac{1}{R} & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}; \quad \Phi(t_k, t_{k-1}) = \begin{pmatrix} 1 & gT_k & 0 \\ -\frac{T_k}{R} & 1 & T_k \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

справедливо для другого компонента скорости, при этом $\mathbf{x} = [\delta V_y, \beta_x, \varepsilon_x]^T$.

Комплексирование ИНС и внешнего источника. Алгоритм расчета «виртуальной» скорости

Известно [2], что за счет «внутренних резервов» (введением каких-либо внутренних связей и дополнений) скоростные ошибки ИНС $\delta V_x, \delta V_y$ и, прежде всего, их основные составляющие, вызванные дрейфом гироскопов и ошибками начальной выставки и текущего горизонтирования, ликвидировать или хотя бы существенно уменьшить невозможно. Устранить или снизить эти ошибки можно лишь путем комплексирования с источником внешней информации по отношению к ИНС.

Рассмотрим метод комплексирования скорости пешеходной ИНС с использованием биомеханической модели движения человека, позволяющей формировать «виртуальное» измерение средней скорости на шаге.

Из числа известных моделей выберем наиболее простую и наглядную кинетическую модель бесколесного двуногого робота, совершающего движения способом поворотного маятника с длиной ноги l (длина ноги пешехода) и вертикальным перемещением центра масс h [4, 6]. Из простых геометрических построений следует, что в этом случае величина шага ΔL рассчитывается по формуле

$$\Delta L = 2\sqrt{2lh - h^2}.$$

На практике для реального пешехода коэффициент «2» перед квадратным корнем может быть заменен на постоянную «с», определяемую предварительно при калибровке. Величина h рассчитывается двойным пошаговым интегрированием ускорения a_z , измеряемого акселерометром в вертикальном канале ИНС:

$$h = \iint a_z \, drdt.$$

Для этой модели средняя скорость на k -м шаге равна отношению длины шага $\Delta L(t_k)$ к его длительности $T_k = t_k - t_{k-1}$ (в общем случае переменной), где t_k, t_{k-1} — моменты начала и конца шага:

$$\bar{V}^{\text{вн}}(t_k) = \frac{\Delta L(t_k)}{T_k}.$$

Здесь индекс «вн» означает внешний для ИНС источник информации. Необходимо подчеркнуть, что в данном случае кинетическая модель движения является не основным, а дополнительным к ИНС средством навигации.

Важной составляющей алгоритма «виртуального» измерения средней скорости является способ фиксации моментов начала и конца шага. Известны способы идентификации шага, основанные на сравнении измеряемого вертикального ускорения с установленным порогом [7, 8]. Однако подобные способы требуют большого объема индивидуальных экспериментальных данных, набора порогов для различных типов движения (ходьба, бег, подъем, спуск, ползание и др.), а также набора поверхностей, по которым движется пешеход (твердая, рыхлая, скользкая и т. п.), и носят эмпирический характер.

Наиболее предпочтительным является способ идентификации шага по величине модуля вектора ускорения $a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}$, определяемого по измерениям трехосевого акселерометра [9]. При этом способе начало (конец) шага определяется как момент перехода через ноль разности измеренного модуля a и ускорения силы тяжести g в данном месте. Важным преимуществом способа является независимость от ориентации пешехода (стоя, лежа, в наклонном положении).

Среднюю скорость \bar{V}^{BH} можно, как и ранее, разложить на два компонента \bar{V}_x^{BH} , \bar{V}_y^{BH} . Важным отличием \bar{V}_x^{BH} , \bar{V}_y^{BH} от компонентов V_x^{IHC} , V_y^{IHC} является то, что погрешности первых обусловлены действием большого числа независимых, различных по природе источников случайных ошибок: погрешностей модели движения, ошибок измерений акселерометра, неточностей определения моментов начала и конца шага, погрешностей расчета вертикального смещения h и др. Поэтому компоненты \bar{V}_x^{BH} , \bar{V}_y^{BH} можно рассматривать как несмещенные относительно истинных значений \bar{V}_x , \bar{V}_y (без систематических медленно меняющихся ошибок) случайные величины:

$$\bar{V}_x^{BH} = \bar{V}_x + n_x; \quad \bar{V}_y^{BH} = \bar{V}_y + n_y,$$

где n_x , n_y — некоррелированные друг с другом и с погрешностями горизонтального канала ИНС

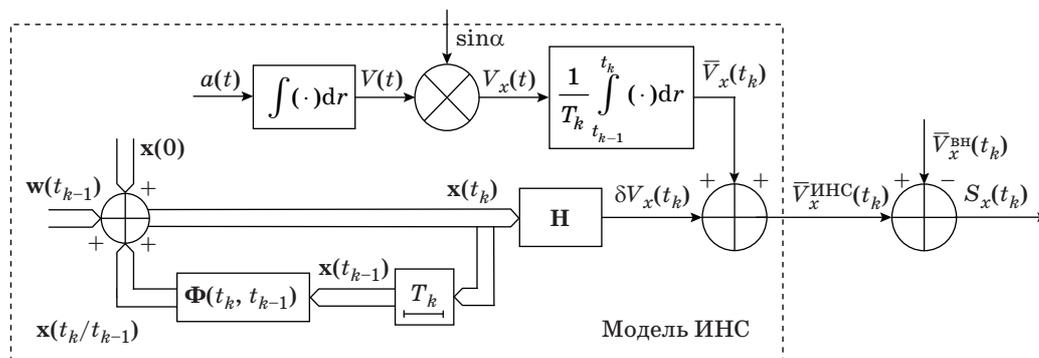
гауссовы шумы (в силу аддитивного воздействия перечисленных выше случайных факторов).

Экспериментальные данные показывают, что даже при движении пешехода с почти постоянной скоростью профиль скорости на каждом шаге имеет колебательный характер с амплитудой порядка 0,3 м/с относительно средней скорости ходьбы [4]. Поскольку мгновенное значение компонента V_x^{IHC} (аналогично V_y^{IHC}), формируемого ИНС, имеет тот же профиль, сравнивать его с \bar{V}_x^{BH} нельзя. Поэтому от V_x^{IHC} следует перейти к пошаговой средней скорости

$$\begin{aligned} \bar{V}_x^{IHC} &= \frac{1}{T_k} \int_{t_{k-1}}^{t_k} V_x^{IHC} dr = \\ &= \frac{1}{T_k} \int_{t_{k-1}}^{t_k} (V_x + \delta V_x) dr = \bar{V}_x + \delta V_x. \end{aligned}$$

Здесь учтено, что медленно меняющаяся погрешность скорости δV_x в течение шага практически постоянна.

В результате комплексирование ИНС и кинетической модели пешехода с использованием средних скоростей $\bar{V}_x^{IHC}(t_k)$, $\bar{V}_x^{BH}(t_k)$ позволяет перейти к разности (скалярной величине) $S_x(t_k) = \bar{V}_x^{IHC}(t_k) - \bar{V}_x^{BH}(t_k) = \delta V_x(t_k) + n_x(t_k)$, где $n_x(t_k)$ — гауссов шум средней скорости $\bar{V}_x^{BH}(t_k)$ с дисперсией σ_x^2 . Разность $S_x(t_k)$ при дальнейшей обработке служит входным измерением для фильтра Калмана [10], формирующего пошаговую оптимальную оценку $\delta \hat{V}_x(t_k)$ погрешности $\delta V_x(t_k)$. Эта оценка и используется при расчете сигналов коррекции ИНС (рис. 2). При этом возможны два подхода: коррекция ИНС по разомкнутой схеме, которая не затрагивает структуру ИНС, и по замкнутой схеме, с использованием отрицательной обратной связи. На рис. 2 показана последовательность изложенных алгоритмов и процедур, моделирующих ИНС с комплексированием от внешнего источника.



■ Рис. 2. Структурная схема модели ИНС

Алгоритм коррекции ИНС по разомкнутой схеме

При разомкнутой схеме коррекции фильтр Калмана имеет традиционную структуру [10], повторяющую уравнение состояния (7), описывающее динамику оцениваемого вектора состояния $\mathbf{x}(t_k) = [\delta V_x(t_k), \beta_y(t_k), \varepsilon_y(t_k)]^T$. Уравнение фильтра имеет вид

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}}(t_k) &= \Phi(t_k, t_{k-1}) \cdot \hat{\mathbf{x}}(t_{k-1}) + \mathbf{K}(t_k) \times \\ &\times (S_x(t_k) - \mathbf{H} \cdot \Phi(t_k, t_{k-1}) \cdot \hat{\mathbf{x}}(t_{k-1})), \\ \hat{\mathbf{x}}(0) &\text{ — начальное условие,} \end{aligned} \quad (8)$$

где $\mathbf{H} = [1, 0, 0]$.

Коэффициент усиления $\mathbf{K}(t_k) = [K_1(t_k), K_2(t_k), K_3(t_k)]^T$ равен

$$\mathbf{K}(t_k) = \frac{1}{\sigma_x^2} \mathbf{P}(t_k) \cdot \mathbf{H}^T = \frac{1}{\sigma_x^2} \begin{bmatrix} P_{11}(t_k) \\ P_{21}(t_k) \\ P_{31}(t_k) \end{bmatrix}, \quad (9)$$

где $[P_{11}(t_k), P_{21}(t_k), P_{31}(t_k)]^T$ — первый столбец ковариационной матрицы $\mathbf{P}(t_k)$ ошибок калмановской оценки $\hat{\mathbf{x}}(t_k) = [\delta \hat{V}_x(t_k), \hat{\beta}_y(t_k), \hat{\varepsilon}_y(t_k)]^T$.

Матрица $\mathbf{P}(t_k)$ определяется соотношениями

$$\begin{aligned} \mathbf{P}(t_k/t_{k-1}) &= \Phi(t_k, t_{k-1}) \cdot \mathbf{P}(t_{k-1}) \cdot \Phi^T(t_k, t_{k-1}) + \mathbf{Q}; \\ \mathbf{P}(t_k) &= \left(\mathbf{P}^{-1}(t_k/t_{k-1}) + \frac{1}{\sigma_x^2} \mathbf{H}^T \mathbf{H} \right)^{-1} = \\ &= \left(\mathbf{P}^{-1}(t_k/t_{k-1}) + \begin{pmatrix} \frac{1}{\sigma_x^2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \right)^{-1}. \end{aligned} \quad (10)$$

Здесь \mathbf{Q} — матрица дисперсий шумов инерциальных датчиков. Значение первого элемен-

та $\delta \hat{V}_x(t_k/t_{k-1})$ экстраполированной векторной оценки $\hat{\mathbf{x}}(t_k/t_{k-1}) = \Phi(t_k, t_{k-1}) \cdot \hat{\mathbf{x}}(t_{k-1})$ подается на выход ИНС, где происходит коррекция (компенсация) ошибки $\delta V_x(t_k)$ в выходном сигнале ИНС:

$$\begin{aligned} \bar{V}_{x, \text{корр}}^{\text{ИНС}}(t_k) &= \bar{V}_x^{\text{ИНС}}(t_k) - \delta \hat{V}_x(t_k/t_{k-1}) = \\ &= \bar{V}_k(t_k) + (\delta V_x(t_k) - \delta \hat{V}_x(t_k/t_{k-1})). \end{aligned} \quad (11)$$

Алгоритм коррекции (11) иллюстрируется структурной схемой (рис. 3). В левой части рисунка приведен фрагмент модели ИНС, представленной на рис. 2.

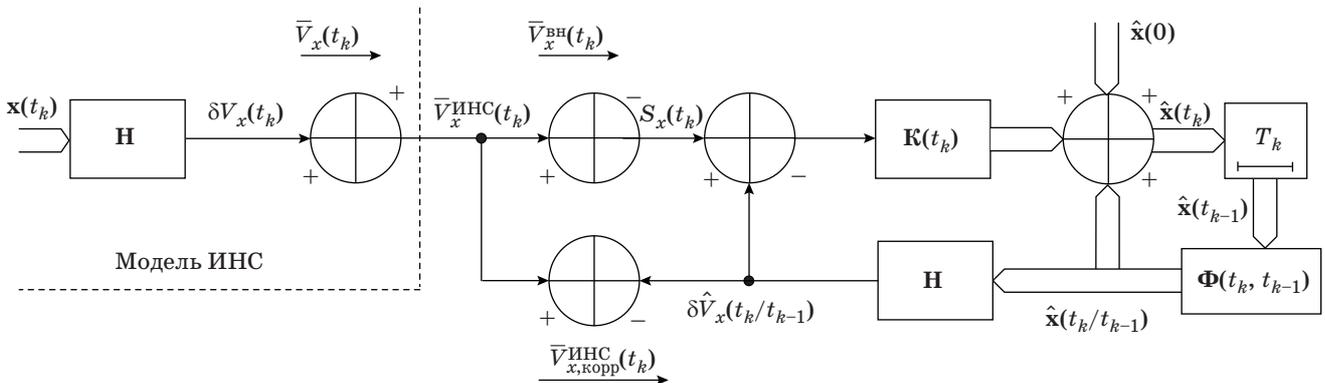
Рассмотренная разомкнутая схема коррекции не затрагивает структуру и динамику ИНС (вектор состояния $\mathbf{x}(t_k)$), а только «сбрасывает» ее ошибку на выходе. В этом случае роль ошибки ИНС играет ошибка экстраполированной оценки $\delta \hat{V}_x(t_k/t_{k-1})$, определяемая первым диагональным элементом ковариационной матрицы $\mathbf{P}(t_k/t_{k-1})$. В номинальном режиме работы фильтра Калмана эта ошибка существенно меньше исходной погрешности $\delta V_x(t_k)$.

Алгоритм коррекции ИНС по замкнутой схеме

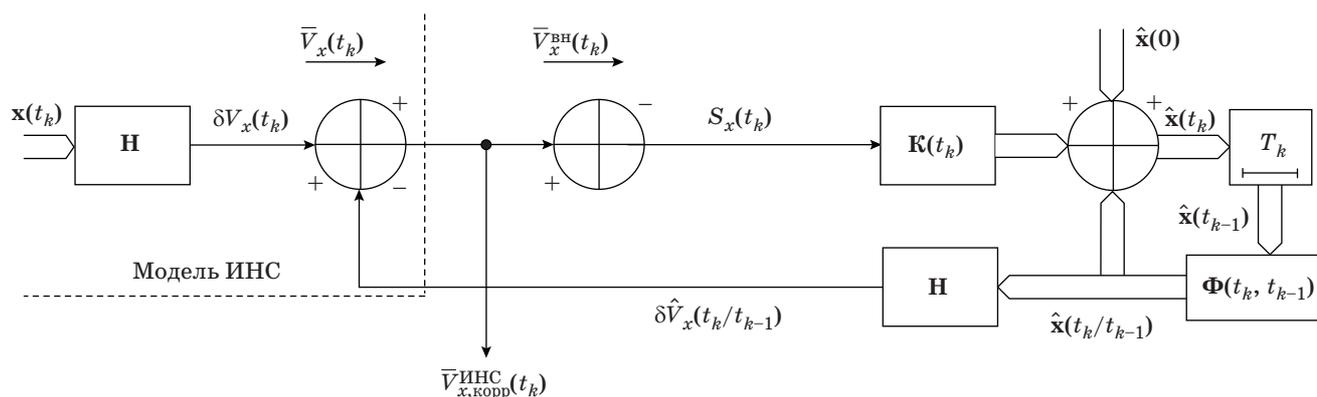
Замкнутая схема предусматривает изменение структуры ИНС за счет отрицательной обратной связи фильтра Калмана по экстраполированной оценке $\hat{\mathbf{x}}(t_k/t_{k-1})$. В этом случае коррекции подвергается исходный вектор состояния $\mathbf{x}(t_k) = [\delta V_x(t_k), \beta_y(t_k), \varepsilon_y(t_k)]^T$ т. е. формируется разность $\mathbf{x}(t_k) - \hat{\mathbf{x}}(t_k/t_{k-1})$, которая далее оценивается фильтром Калмана. Иными словами, уравнение состояния (7) трансформируется к виду

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(t_k) &= \Phi(t_k, t_{k-1}) \cdot \mathbf{x}(t_{k-1}) + \mathbf{w}(t_{k-1}) - \\ &- \Phi(t_k, t_{k-1}) \cdot \hat{\mathbf{x}}(t_{k-1}). \end{aligned} \quad (12)$$

Рассматривая корректирующее слагаемое $\Phi(t_k, t_{k-1}) \cdot \hat{\mathbf{x}}(t_{k-1})$ в (12) как известную детерми-



■ Рис. 3. Структурная схема алгоритма коррекции по разомкнутой схеме



■ Рис. 4. Структурная схема алгоритма коррекции по замкнутой схеме

нированную управляющую функцию [2], приходим к более простой по сравнению с (8) форме фильтра Калмана

$$\hat{\mathbf{x}}(t_k) = \mathbf{K}(t_k) \cdot S_x(t_k),$$

$\hat{\mathbf{x}}(0)$ — начальное условие. (13)

Для фильтра (13) остаются справедливыми соотношения (9), (10).

Структурная схема алгоритма применительно к рассматриваемой задаче коррекции ИНС по ошибке скорости $\delta V_x(t_k)$ приведена на рис. 4. Заметим, что в этом случае входное измерение для фильтра Калмана равно $S_x(t_k) = \delta V_x(t_k) - \delta \hat{V}_x(t_k/t_{k-1}) + n_x(t_k)$.

В номинальных условиях разомкнутый и замкнутый алгоритмы коррекции по точности эквивалентны. Свидетельством этому является общность для обоих алгоритмов априорной ковариационной матрицы ошибок фильтрации $\mathbf{P}(t_k)$. Однако на практике в условиях неизбежных отличий принятых моделей ИНС и внешнего источника и, как следствие, настроек фильтров от реальной динамики процесса навигации пешехода более предпочтительным является алгоритм коррекции по замкнутой схеме. Причина этого — наличие в структуре ИНС обратной связи, демпфирующей возникающие рассогласования. Немаловажно и то, что фильтр (13) более прост в реализации, чем фильтр (8).

Итоговые координаты рассчитываются по очевидным формулам

$$x(t_k) = x(t_0) + \sum_{i=1}^k \bar{V}_{x, \text{корр}}^{\text{ИНС}}(t_i) T_i;$$

$$y(t_k) = y(t_0) + \sum_{i=1}^k \bar{V}_{y, \text{корр}}^{\text{ИНС}}(t_i) T_i, \quad (14)$$

численно реализующим исходные соотношения (3). Здесь $x(t_0), y(t_0)$ — координаты пешехода в момент начала движения t_0 .

Приведенные соотношения и структурные схемы алгоритмов (см. рис. 2–4), начиная с процедур формирования средних скоростей $\bar{V}_x^{\text{ИНС}}$, $\bar{V}_y^{\text{ВН}}$ (аналогично $\bar{V}_y^{\text{ИНС}}$, $\bar{V}_x^{\text{ВН}}$), определяют последовательность вычислительных операций, подлежащих реализации в модуле автономной навигации.

Заключение

Описанный в статье подход позволяет осуществить комплексирование данных от различных навигационных источников информации о движении человека. Показана целесообразность использования калмановской фильтрации в пешеходных навигационных системах. Представленные результаты предоставляют необходимые алгоритмы обработки и измерительной информации инерциальных датчиков, которые могут непосредственно применяться разработчиками высокоточных автономных систем позиционирования человека на местности.

Литература

1. Красовский А. А., Лебедев А. В., Невструев В. В. Теоретические основы пилотажно-навигационных комплексов. — М.: ВВИА им. Н. Е. Жуковского, 1981. — 373 с.
2. Кузовков Н. Т., Салычев О. С. Инерциальная навигация и оптимальная фильтрация. — М.: Машиностроение, 1982. — 216 с.
3. Ярлыков М. С. Статистическая теория радионавигации. — М.: Радио и связь, 1985. — 344 с.
4. Дэвидсон П., Такала Я. Разработка алгоритмов инерциальной навигационной системы с учетом особенностей походки человека // Гироскопия и навигация. 2013. № 1. С. 54–86.
5. Salychev O. S. Applied Inertial Navigation: Problems and Solutions. — М.: BMSTU Press, 2004. — 306 p.

6. Jahn J., Batzer U., Seitz J., Patino-Studencka L., Boronat J. G. Comparison and Evaluation of Acceleration Based Step Length Estimators for Handheld Devices // Proc. of IEEE 2nd Conf. on Indoor Positioning and Indoor Navigation, Zurich, Switzerland, 15–17 Sept. 2010. P. 1–6.
7. Ladetto Q., Merminod B. Digital Magnetic Compass and Gyroscope Integration for Pedestrian Navigation // 9th St. Petersburg Intern. Conf. on Integrated Navigation Systems, Saint-Petersburg, 27–29 May 2002. P. 10.
8. Leppakoski H., Kappi J., Syrjarinne J., Takala J. Error Analysis of Step Length Estimation in Pedestrian Dead Reckoning // Proc. of ION GPS/GNSS. Portland, OR, 24–27 Sept. 2002. The Institute of Navigation, 2002. P. 1136–1142.
9. Matthews C., Ketema Y., Gebre-Egziabher D., Schwartz M. In-Situ Step Size Estimation Using a Kinetic Model of Human Gait // Proc. of ION GNSS, Portland, OR, 21–24 Sept. 2010. P. 511–524.
10. Браммер К., Зиффлинг Г. Фильтр Калмана — Бьюси. — М.: Наука, 1982. — 200 с.

UDC 621.396.96

doi:10.15217/issn1684-8853.2015.6.86

Using Autonomous Navigation Systems for High-Precision Positioning of a Pedestrian on the GroundKaplina A. Y.^a, PhD, Tech., a.kaplin@list.ruStepanov M. G.^a, Dr. Sc., Tech., Professor, smg099@mail.ru^aОАО «Radioavionika», 4B, Troitskii Pr., 190005, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: Currently, to determine the coordinates of a pedestrian on the ground, an autonomous navigation system is used, which includes a triaxial accelerometer and a triaxial gyroscope. A disadvantage of this system is the gradual accumulation of erroneous information from its components, due to unaccounted systematic errors. This accumulated error cannot be compensated without an additional external source of information. **Purpose:** The goal of this work is investigating the possibility to adapt the algorithms of an inertial coordinate reference system using data from an external source, and developing an algorithm to integrate the information in order to compensate for the errors in the positioning of the pedestrian. **Results:** The possibility is demonstrated and a method is suggested for integrating the information from an autonomous inertial navigation system and an external independent source of information which is an information signal from a biomechanical model of pedestrian movement. The method is represented by two algorithms. The first algorithm is implemented in the form of an open circuit in which the structure of the inertial system does not change. The second one is implemented as a closed circuit with a feedback. The structure of the inertial system changes, but it is more resistant to changes in the assumptions made during the synthesis of the proposed algorithms. **Practical relevance:** High-precision determination of the coordinates of a pedestrian on the ground is necessary in many situations, particularly when performing rescue operations.

Keywords — Autonomous Navigation, Inertial Navigation System, Kalman Filter, Accelerometer, Gyroscope.

References

1. Krasovskii A. A., Lebedev A. V., Nevstruev V. V. *Teoreticheskie osnovy pilotazhno-navigatsionnykh kompleksov* [Theoretical Basis of Flight Control and Navigation Systems]. Moscow, VVIA im. N. E. Zhukovskogo Publ., 1981. 373 p. (In Russian).
2. Kuzovkov N. T., Salychev O. S. *Inertial'naiia navigatsiia i optimal'naiia fil'tratsiia* [Inertial Navigation and Optimal Filtering]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1982. 216 p. (In Russian).
3. Iarlykov M. S. *Statisticheskaiia teoriia radionavigatsii* [Statistical Theory Navigation]. Moscow, Radio i sviaz' Publ., 1985. 344 p. (In Russian).
4. Davidson P., Takala J. Development of Algorithms of Inertial Navigation System Based on Features of Human Gait. *Giroskopiia i navigatsiia* [Gyroscopy and Navigation], 2013, no. 1, pp. 54–86 (In Russian).
5. Salychev O. S. *Applied Inertial Navigation: Problems and Solutions*. Moscow: BMSTU Press, 2004. 306 p.
6. Jahn J., Batzer U., Seitz J., Patino-Studencka L., Boronat J. G. Comparison and Evaluation of Acceleration Based Step Length Estimators for Handheld Devices. *Proc. of IEEE 2nd Conf. on Indoor Positioning and Indoor Navigation*, Zurich, Switzerland, 15–17 September 2010, pp. 1–6.
7. Ladetto Q., Merminod B. Digital Magnetic Compass and Gyroscope Integration for Pedestrian Navigation. *9th St. Petersburg Intern. Conf. on Integrated Navigation Systems*, Saint-Petersburg, 27–29 May 2002, p. 10.
8. Leppakoski H., Kappi J., Syrjarinne J., Takala J. Error Analysis of Step Length Estimation in Pedestrian Dead Reckoning. *Proc. of ION GPS/GNSS*, Portland, OR, The Institute of Navigation, 24–27 September 2002, pp. 1136–1142.
9. Matthews C., Ketema Y., Gebre-Egziabher D., Schwartz M. In-Situ Step Size Estimation Using a Kinetic Model of Human Gait. *Proc. of ION GNSS*, Portland, OR, 21–24 September 2010, pp. 511–524.
10. Brammer K., Siffing G. *Fil'tr Kalmana-B'iusi* [Kalman-Bucy-Filter]. Moscow, Nauka Publ., 1989. 200 p. (In Russian).

УДК 504.064.3

doi:10.15217/issn1684-8853.2015.6.93

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ЗАЩИТЫ ТЕРРИТОРИИ ТОПЛИВНО- ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ОТ ПОДТОПЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ГЕОИНФОРМАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Н. А. Жильникова^а, канд. техн. наук, доцент

В. В. Алексеев^б, доктор техн. наук, профессор

И. А. Шишкин^в, канд. техн. наук, руководитель компьютерного экологического центра

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

^бСанкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, РФ

^вСанкт-Петербургский государственный технологический университет растительных полимеров, Санкт-Петербург, РФ

Постановка проблемы: для создания эффективной системы мониторинга состояния технических сооружений инженерной защиты территории от подтопления для топливно-энергетического комплекса необходима организация алгоритмического обеспечения информационно-измерительных систем. **Методы:** геоинформационное моделирование, математические методы аппроксимации и методы метрологического анализа. **Результаты:** разработана структура представления инженерных сооружений защиты территории от подтопления в виде объектов геоинформационных систем, что позволяет реализовать анализ и обработку данных средствами геоинформационной системы, автоматизировать проведение мониторинга в рамках проекта геоинформационной системы оценки состояния инженерных сооружений защиты территории от подтопления для топливно-энергетического комплекса. Представлен алгоритм формирования простых и интегральных нормированных оценок состояния территорий и инженерных сооружений защиты территории от подтопления по результатам информационно-измерительных систем мониторинга. Единство измерений достигается при организации множества оценок в виде нормированного параметрического пространства с обязательным формированием характеристик достоверности (неопределенности) для каждого значения контролируемых параметров. **Практическая значимость:** предложенные алгоритм и методика позволяют вести оперативный анализ характеристик по результатам контроля, принимать оперативное решение при проведении мероприятий технического обслуживания инженерных сооружений защиты территории от подтопления, решать задачи наиболее эффективного вложения средств на ремонт и реконструкцию инженерных сооружений.

Ключевые слова — измерительная система, технические сооружения, контрольные измерения, геоинформационная подсистема, сложная оценка, оценка риска.

Введение

Одной из важных задач обеспечения безопасности функционирования топливно-энергетических комплексов является создание системы мониторинга и оценки состояния технических сооружений системы инженерной защиты территории от подтопления (СИЗТП), контролирующей и сопровождающей все работы жизненного цикла таких сооружений. Информационная организация информационно-измерительной системы (ИИС) мониторинга и оценки состояния технических сооружений СИЗТП на базе геоинформационной технологии включает измерительную и геоинформационную подсистемы. Первая состоит из аппаратно-алгоритмического и нормативно-методического обеспечения и направлена на получение исходной информации о состоянии контролируемого объекта, а также обеспечение ввода полученных результатов в базу данных геоинформационной подсистемы. Вторая представляет собой программную среду, которая поддер-

живает работу с базами данных, реализует алгоритмическое обеспечение обработки и анализа данных, получения простых и сложных оценок, характеристик объектов, обеспечивает принятие управляющих решений.

Основные положения, определяющие решение рассматриваемой проблемы

Одной из важнейших задач развивающихся территорий, особенно в районе крупных топливно-энергетических комплексов (ТЭК), является создание и поддержание заданного водного режима, обеспечение нормативного водного баланса в различных ситуациях, в условиях природных и техногенных воздействий [1].

Водный баланс определяет условия существования и развития территориальной системы по характеристикам створов. Створ представляет собой поперечное сечение водотока (канала), в котором проводятся наблюдения за уровнями воды и эпизодические измерения расходов воды. По

характеристикам створа (некоторому множеству параметров) оценивается потенциальная подтопленность территории в зависимости от степени опасности и уязвимости анализируемой территории.

Использование географических информационных систем (ГИС) как систем, предназначенных для сбора, хранения, анализа и графической визуализации пространственных данных, позволяет эффективно решать задачи поддержки принятия управляющих решений [2]. ГИС-технологии являются удобным инструментом при решении задач районирования территорий, оценки состояния территории, описания системы водопользования и водного баланса территории, ее свойств в зависимости от целевого назначения и применения. ГИС имеет развитые средства, позволяющие: 1) формировать модель системы защиты территорий от подтопления, которая описывает структуру системы и входящие в ее состав инженерные сооружения; 2) предоставлять характеристики сооружений в виде геоданных; 3) получать результаты контроля состояния инженерных сооружений (ИС), которые могут являться многопараметрическими сложными характеристиками; 4) осуществлять прогнозирование изменения характеристик состояния ИС на основании сформированных моделей [3].

Формирование ГИС-проектов оценки состояния территорий и ИС СИЗТП на основе данных контроля и инвентаризационных обследований с использованием ИИС мониторинга проводится путем представления структуры СИЗТП в ГИС-технологии в целях обеспечения автоматического определения и анализа характеристик ИС [4–6].

Формирование картографической модели территории в соответствующем масштабе с помощью ГИС-технологий обеспечивает отображение гидрологических условий, существующих и проектируемых техногенных нагрузок, специфичных для ТЭК.

Одни из основных преимуществ ГИС: наглядность, быстрый и простой доступ к данным и их обновление — позволяют, группируя и сравнивая данные, получать оценки, отображать динамику развития ситуаций, лучше понимать ситуацию, определять тенденции и особенности, выявлять наиболее вероятные последствия принятых решений и действий на этапе принятия решений.

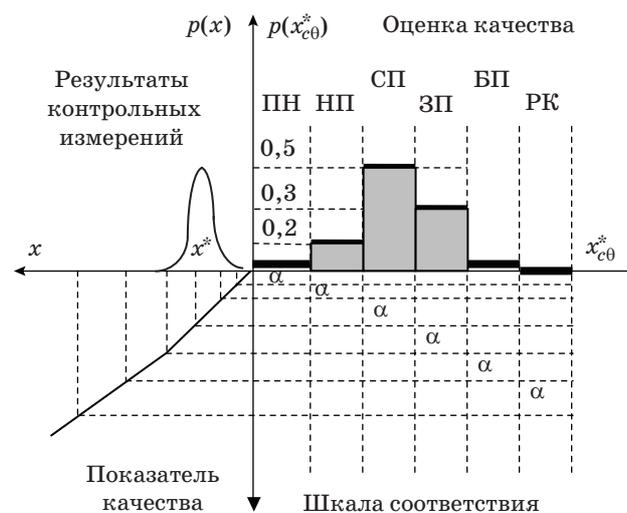
Таким образом, для использования преимуществ ГИС-технологии при решении задач оценки состояния ИС СИЗТП и поддержки принятия управляющих решений необходимо определить принципы районирования территорий, основы моделирования ИС, разработать алгоритмическое и методическое обеспечение получения оценок состояния ИС на ГИС-основе, формирования ГИС-проектов для автоматизированного решения перечисленных задач.

Получение оценок состояния ИС СИЗТП по результатам контрольных измерений

Состояние ИС СИЗТП характеризуется множеством физических величин. Результат контрольного измерения представляет собой числовое значение контролируемого параметра в единицах представления физической величины. Степень достоверности (неопределенности) получаемых результатов контроля определяется суммарной погрешностью полученной оценки $f(x^*, \sigma)$. Так как закон распределения погрешности в большинстве случаев имеет симметричную форму, доверительный интервал оценки может быть определен как $x^* \pm k\sigma$ [7].

Рассмотрим возможный вариант нормирования контрольных измерений как оценки состояния ИС в виде качественной шкалы. Качественные отношения представим в виде нормированной шкалы с равными отрезками и условными отношениями: 0–1 — повреждений нет (ПН), 1–2 — незначительные повреждения (НП), 2–3 — средние повреждения (СП), 3–4 — значительные повреждения (ЗП), 4–5 — большие повреждения (БП), 5–6 — канал разрушен (КР).

Значение контролируемой величины на нормированной шкале качественных отношений может быть определено как вероятность нахождения результата контрольного измерения в соответствующем интервале показателей. На рисунке приведен пример представления результатов измерений x^* в качественной шкале для случая, когда результат контрольных измерений имеет следующие метрологические характеристики: $x^* = x^* \pm k\sigma = x^* \pm 0,5x^*$.



■ Плоскость соответствия результата контрольных измерений (одно измерение с известными метрологическими характеристиками) и нормированных значений качественной оценки

Вероятность принятия того или иного значения качества может быть определена как

$$p_i = \int_{x_{i-1}}^{x_i} f(x^*) dx = 0,01 \div 6.$$

Результаты интегрирования имеют значения (см. рисунок):

$$p_1 = \int_{x_{i-1}}^{x_i} f(x^*) dx = 0,01; \quad p_2 = \int_{x_{i-1}}^{x_i} f(x^*) dx = 0,18;$$

$$p_3 = \int_{x_{i-1}}^{x_i} f(x^*) dx = 0,5; \quad p_4 = \int_{x_{i-1}}^{x_i} f(x^*) dx = 0,3;$$

$$p_5 = \int_{x_{i-1}}^{x_i} f(x^*) dx = 0,01; \quad p_6 = \int_{x_{i-1}}^{x_i} f(x^*) dx = 0,00.$$

Таким образом, любой результат измерения может быть сведен к нормированной оценке состояния контролируемого объекта. В итоге будет получено множество оценок контрольных измерений параметров состояния сооружений $X_c = \{x_{c1}^*, x_{c2}^*, \dots, x_{c\theta}^*, \dots, x_{c\Theta}^*\}$, где $\theta = 1; \Theta$ — индексы контролируемых параметров (физических, гидродинамических, биологических и др.).

Алгоритм формирования ГИС-проекта защиты территории ТЭК от подтопления и поддержки принятия эффективных решений

Наряду с экспертной оценкой состояния территорий, выше рассмотрен основной этап получения оценок опасности от подтопления по результатам контрольных измерений для критических створов (инженерных сооружений) на основе разработанного принципа районирования территорий и методического обеспечения получения оценок, представленных в работе [8]. ГИС-технология позволяет автоматизировать процесс оценивания, систематизацию результатов анализа полученных оценок и представление этих результатов в удобном виде для специалиста, принимающего решение по дальнейшей эксплуатации ИС СИЗТП [9].

Рассмотрим методику формирования ГИС-проекта, направленного на определение оценок и ранжирование ИС по степени опасности и поддержку принятия решений. Рассматриваемый ГИС-проект опирается на результаты, которые представляют собой набор створов, упорядоченных по степени опасности, и географические данные, которые могут быть представлены в виде слоев ГИС [10].

Проект ГИС ранжирования ИС по степени опасности включает следующие этапы.

1. Формирование географической основы для решения поставленной в техническом задании задачи.

2. Реализация ГИС-проекта и использование в качестве базы его результатов.

3. Определение для каждого опасного створа территории зоны подтопления и районирование территории подтопления по степени опасности от подтопления.

4. Получение для каждого опасного створа оценок опасности подтопления, уязвимости подтопления и риска от подтопления для соответствующих территорий.

5. Ранжирование створов по степени риска подтопления подпадающих под их воздействие территорий.

6. Оценка объема работ (затрат), необходимых для восстановления проектных характеристик канала, и эффективности их проведения.

7. Оценка объемов возможного ущерба в случае подтопления территории из-за нарушения функционирования канала.

8. Ранжирование сооружений по степени опасности (возможному ущербу от затопления территории).

9. Решение задачи наиболее эффективного вложения средств на ремонт и реконструкцию инженерных сооружений.

10. Предоставление результатов анализа в ранжированном виде.

Заключение

Предложен алгоритм формирования простых и интегральных нормированных оценок состояния территорий и ИС СИЗТП по результатам ИИС мониторинга. Единство измерений достигается при организации множества оценок в виде нормированного параметрического пространства с обязательным формированием характеристик достоверности (неопределенности) для каждого значения контролируемых параметров.

На основании предложенных алгоритма и методики построения ГИС-проекта защиты территории ТЭК от подтопления специалист получает возможность вести оперативный анализ характеристик по результатам контроля, быстро принимать решение при проведении мероприятий технического обслуживания ИС СЗТП, определять области наиболее эффективного вложения средств при ремонте и реконструкции инженерных сооружений.

Литература

1. Жильникова Н. А. Эколого-технологическое нормирование нагрузки на окружающую среду на предприятиях радиоэлектроники // Радиопромышленность. 2014. Вып. 2. С. 112–118.
2. Бескид П. П., Куракина Н. И., Орлова Н. В. Геоинформационные системы и технологии. — СПб.: РГГМУ, 2010. — 173 с.
3. Чусов А. Н., Антонов И. В., Шишкин А. И. Методология нормирования антропогенного воздействия на основе геоинформационной моделирующей системы // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2014. № 3(18). С. 25–37.
4. Шишкин И. А. Оценка состояния подтопляемых территорий на ГИС-основе // Сб. материалов Биосфорума. Т. 2. СПб.: Любавич, 2012. С. 301–305.
5. Алексеев В. В., Орлова Н. В., Шишкин И. А., Гусева Е. С., Жигновская А. С. ГИС мониторинга состояния инженерных сооружений защиты территории от подтопления. — СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2012. — 27 с.
6. Алексеев В. В., Шишкин И. А. Геоинформационная система оценки состояния технических сооружений защиты территории от подтопления // Вестник ТОГУ. 2012. № 4(27). С. 69–78.
7. Shishkin I., Antonov I., Epifanov A. Geoinformation Modeling Complex for Rationing of Technogenic Loading // Environmental Protection of Urban and Suburban Settlements: Proc. of XVII Intern. Eco-conference, Novosad, Serbia, 2013. P. 299–306.
8. Алексеев В. В., Шишкин И. А. ИИС мониторинга состояния системы инженерной защиты территории от подтопления на базе ГИС. Ч. 2: Получение оценок, поддержка принятия управленческих решений // Приборы. 2012. № 6. С. 28–37.
9. Семенова Е. Г., Жильникова Н. А., Милова В. М. Системотехнический принцип повышения эффективности функционирования производственных систем // Вопросы радиоэлектроники. Радиолокационная техника (РЛТ). 2014. № 4. С. 125–130.
10. Орлова Н. В. Алгоритмическое обеспечение геоинформационной системы оценки состояния природного объекта: дис. ... канд. техн. наук /СПбГЭТУ, 2010. — 122 с.

UDC 504.064.3

doi:10.15217/issn1684-8853.2015.6.93

Geoinformational Information-Measuring System for Flood Protection Monitoring of Fuel-Power Complex Territory

Zhilnikova N. A.^a, PhD, Tech., Associate Professor, nataliazhilnikova@gmail.comAlekseev V. A.^b, Dr. Sc., Tech., Professor, vvalekseyev@mail.ruShishkin I. A.^c, PhD, Tech., Head of Ecological Computer Center, _ilia@mail.ru^aSaint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaia St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation^bSaint-Petersburg State Electrotechnical University «LETI», 5, Prof. Popov St., 197376, Saint-Petersburg, Russian Federation^cSaint-Petersburg State Technological University of Plant Polymers, 4, Ivan Chernykh St., 198095, Saint-Petersburg, Russian Federation

Purpose: To create an efficient system of monitoring the state of flood-protection constructions for a fuel-power complex, the respective data-measuring systems need a proper algorithmic provision. **Methods:** The research used geoinformational simulation, mathematical approximation and meteorological analysis. **Results:** A structure has been developed to represent the engineering constructions protecting the area from flooding as geoinformational system objects. This allows you to analyze and process the data treatment by the tools of a geoinformational system and to provide automatic monitoring. An algorithm is proposed for forming simple and integral normed assessments of the state of territories and flood-protection engineering plants by the results of control measurements. Traceability is provided by organizing a plurality of estimates as a normalized parametric space with obligatory characteristics of reliability (uncertainty) for each value of the monitored parameters. **Practical relevance:** The proposed algorithm and methods for developing a GIS project can help to promptly analyze the characteristics by the results of the monitoring, to make quick decisions during the maintenance activities at flood-protection engineering plants, and to solve the problems of efficient investment for their maintenance and reconstruction.

Keywords — Measuring System, Engineering Construction, Control Measurements, Geoinformational Subsystem, Complex Estimation, Risk Assessment.

References

1. Zhil'nikova N. A. Ecological Technological Standardization of Loading on Environment by Enterprises of Radio Electronics. *Radiopromyshlennost'*, 2014, iss. 2, pp. 112–118 (In Russian).
2. Beskid P. P., Kurakina N. I., Orlova N. V. *Geoinformatsionnye sistemy i tekhnologii* [Geoinformation Systems and Technologies]. Saint-Petersburg, Rossiiskii gosudarstvennyi gidrometeorologicheskii universitet Publ., 2010. 173 p. (In Russian).

3. Chusov A. N., Antonov I. V., Shishkin A. I. Methodology of Anthropogenic Impact on Basis of Geographic Information Modeling System. *Stroitel'stvo unikal'nykh zdanii i sooruzhenii*, 2014, no. 3(18), pp. 25–37 (In Russian).
4. Shishkin I. A. Assessment of the State Flooded Territories Based on GIS. *Sbornik materialov Bios foruma*, Saint-Petersburg, Liubavich Publ., 2012, vol. 2, pp. 301–305 (In Russian).
5. Alekseev V. V., Orlova N. V., Shishkin I. A., Guseva E. S., Zhignovskaia A. S. *GIS monitoringa sostoiianiia inzhernykh sooruzhenii zashchity territorii ot podtopleniia* [GIS for Monitoring the State of Engineering Constructions to Protect the Area from Flooding]. Saint-Peterburg, Sankt-Peterburgskii gosudarstvennyi elektrotekhnicheskii universitet «LETI» Publ., 2012. 27 p. (In Russian).
6. Alekseev V. V., Shishkin I. A. Geoinformation System Assessment of the Technical Installations Protect the Territory from Flooding. *Vestnik TOGU*, 2012, no. 4(27), pp. 69–78 (In Russian).
7. Shishkin I., Antonov I., Epifanov A. Geoinformation Modeling Complex for Rationing of Technogenic Loading. *Proc. XVII Intern. Eco-conference "Environmental Protection of Urban and Suburban Settlements"*, Novosad, Serbia, 2013, pp. 299–306.
8. Alekseev V. V., Shishkin I. A. IMS System Monitoring Engineering Protect a Territory from Flooding Based on GIS. Part 2. Estimation, Support of Management Decision Making. *Pribory*, 2012, no. 6, pp. 28–37 (In Russian).
9. Semenova E. G., Zhil'nikova N. A., Milova V. M. Systems Engineering Principle of Increasing the Efficiency of Production Systems. *Voprosy radioelektroniki. Radiolokatsionnaia tekhnika (RLT)*, 2014, no. 4, pp. 125–130 (In Russian).
10. Orlova N. V. *Algoritmicheskoe obespechenie geoinformatsionnoi sistemy otsenki sostoiianiia prirodnogo ob'ekta*. Dis. kand. tehn. nauk [Algorithmic Support Geographic Information System Assess the Status of the Object. PhD tech. sci. diss.]. Saint-Petersburg, Sankt-Peterburgskii gosudarstvennyi elektrotekhnicheskii universitet «LETI», 2010. 122 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>

«ВТЛ» (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-upravlyayuschiesistemy).

УДК 378.15

doi:10.15217/issn1684-8853.2015.6.98

ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ УЧЕБНЫХ КУРСОВ В ПРОЦЕССЕ ИЗУЧЕНИЯ ИНОСТРАННОГО ЯЗЫКА В ВЫСШЕМ УЧЕБНОМ ЗАВЕДЕНИИ

А. Л. Прокофьева^а, старший преподаватель

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

Цель: обоснование эффективности использования электронных учебных курсов при изучении иностранного языка в высших учебных заведениях в целях ускорения закрепления и совершенствования навыков в области основ грамматики. **Результаты:** представлены общий подход к формированию структуры электронных учебных курсов по иностранному языку в виде взаимосвязанных функциональных подсистем и практические рекомендации по применению компьютерных обучающих программ при подготовке специалистов для осуществления переводческой деятельности в сфере профессиональной коммуникации. Структурно предложенные компьютерные обучающие программы содержат три функциональные подсистемы: информационно-навигационную, содержательную и диагностирующую.

Практическая значимость: использование авторского электронного учебного курса «Грамматика английского языка» позволяет значительно ускорить процесс усвоения грамматики по сравнению с традиционной системой преподавания иностранного языка в высших учебных заведениях, основанной на преимущественном проведении групповых аудиторных занятий с преподавателем.

Ключевые слова — информационные образовательные технологии, компьютерная обучающая программа, электронный учебный курс, тестирование знаний.

Введение

Развитие информационных технологий закономерно приводит к появлению новых способов и форм организации обучения. Современный уровень высшей школы характеризуется глобальной информатизацией образовательного процесса, направленной на повышение эффективности профессиональной подготовки специалистов, вывод образования на качественно новый уровень [1]. Применение новых информационных и телекоммуникационных технологий в учебном процессе, создание и использование электронных учебных материалов и компьютерных обучающих программ решают сложные задачи формирования единой образовательной информационной среды.

Разработка и внедрение компьютерных обучающих программ зачастую опережает научно-методическое обоснование принципов их построения и применения с учетом особенностей изучаемых учебных дисциплин. В этих условиях необходимо определить принципы интеграции современных педагогических и информационных технологий, а также моделей проектирования и применения в учебном процессе электронных образовательных ресурсов. Требуется, с одной стороны, обоснование общей структуры таких моделей и компьютерных обучающих программ в виде функциональных подсистем, с другой стороны, систематизация различных образовательных программных средств и оболочек, которая позволит преподавателям эффективно их использовать в учебном процессе [2].

Указанная ситуация характерна для изучения в высших учебных заведениях иностранного

языка. Общеизвестно, что совершенствование учебного процесса и повышение уровня подготовки по иностранному языку возможны при использовании в педагогической практике новых информационных образовательных технологий [3]. Однако для этого необходимо научно-методическое обоснование рациональных форм применения информационных образовательных технологий и их места в учебном процессе с учетом особенностей формирования у обучающихся профессиональных компетенций. Это особенно важно при подготовке специалистов переводческой деятельности в сфере профессиональной коммуникации, требующей постоянного применения знаний иностранного языка и наличия устойчивых навыков в области основ грамматики, практически доведенных до автоматизма.

Следует также отметить, что современные цели обучения иностранному языку в высшей школе в контексте лично-ориентированного подхода выдвигают задачи индивидуализации, дифференциации и интенсификации учебного процесса с тем, чтобы максимально активизировать деятельность каждого обучающегося. Создание новых обучающих компьютерных программ способствует достижению этих целей, позволяет преподавателю наилучшим образом решать образовательные задачи [4]. В настоящей работе обоснована общая структура компьютерных обучающих программ для изучения иностранного языка в виде функциональных подсистем и изложен опыт разработки и использования авторского электронного учебного курса «Грамматика английского языка».

Применение современных информационных образовательных технологий в процессе изучения иностранного языка

Традиционная система преподавания иностранного языка в высших учебных заведениях основана на преимущественном проведении групповых аудиторных занятий с преподавателем [5]. В то же время глобальная информатизация образовательного процесса и интенсивное развитие современных информационных образовательных технологий приводят к их активному внедрению в учебный процесс, зачастую с опережением соответствующего научно-методического обоснования. В этих условиях обоснование общей структуры и систематизация компьютерных обучающих программ позволили бы преподавателям эффективно использовать различные электронные образовательные средства в учебном процессе с учетом особенностей формирования у обучающихся профессиональных навыков и компетенций.

Для системы высшего профессионального образования в целом наиболее актуальна разработка информационных образовательных технологий, обладающих следующими возможностями [6]:

- доступное изложение материала повышенной сложности, обусловленной содержанием предметной области, свойствами изучаемых объектов и явлений;

- отражение большого объема теоретических понятий, высокой степени их логической взаимосвязи, высокого уровня иерархичности изучаемых объектов и явлений, многообразия реальных систем;

- отработка большого объема различных контролируемых и тренировочных действий.

Применение современных информационных образовательных технологий позволяет вывести профессиональное образование на качественно новый уровень и осуществить серьезные изменения в сфере обучения по следующим направлениям:

- значительно расширяются возможности предъявления учебной информации, разрабатываются разнообразные формы деятельности обучающихся по самостоятельному извлечению и представлению знаний;

- усиливается мотивация обучения за счет новизны работы с информационными технологиями, занимательности обучения, возможностей регулирования уровня сложности учебных задач и оказания помощи в процессе их решения;

- обучающиеся активно вовлекаются в учебный процесс, появляются широкие возможности тестирования и диагностирования уровня знаний, умений, навыков, подготовки к конкретному занятию;

- расширяются наборы решаемых учебных задач, в большинстве случаев поддерживается управление процессом решения задач обучающимися;

- качественно изменяется содержание контроля учебной деятельности, возможна его автоматизация, организация тестирования, тренингов, при этом обеспечивается гибкость управления процессом обучения;

- организуется работа в современных телекоммуникационных средах, обеспечивается управление информационными потоками.

Отмеченные направления реализуются не простым переводом учебно-методической литературы в электронный вид, а путем создания и использования различных видов компьютерных обучающих программ. При создании компьютерных обучающих программ могут быть использованы базовые информационные технологии. Новые возможности, открываемые при внедрении новых информационных образовательных технологий, можно проиллюстрировать на примере мультимедиа-технологий. На их основе могут создаваться электронные образовательные средства — от электронных учебников и учебных пособий с высокой динамикой иллюстративного материала до компьютерных обучающих систем виртуальной реальности, в которой обучающийся становится участником компьютерной модели, отображающей окружающий мир. И если в электронных учебниках и учебных пособиях используются, прежде всего, мультимедийные возможности отображения информации, то компьютерные обучающие системы реализуют моделирование изучаемых процессов и явлений, создают новую учебную компьютерную среду, в которой обучающийся является активным участником.

Для информатизации учебного процесса и использования компьютерных обучающих систем при изучении в высших учебных заведениях иностранного языка характерны следующие две особенности. Во-первых, использованию компьютерных обучающих систем практически по любой теме предшествуют аудиторные занятия с преподавателем, дающие начальный объем знаний и первичные навыки. Во-вторых, главным принципом использования компьютерных обучающих систем является ориентация на те случаи, когда они могут эффективно заменить преподавателя при достижении поставленной педагогической задачи. Например, в ходе групповых аудиторных занятий с преподавателем за отведенное учебным планом время невозможно обеспечить формирование у всех обучающихся устойчивых навыков перевода определенных грамматических конструкций. В то же время при наличии первичных навыков перевода, полученных во время групповых аудиторных занятий, все обучающиеся

ся могут их закрепить и довести до автоматизма при использовании компьютерных обучающих систем, причем каждому для этого потребуется определенное время подготовки.

Рассмотренная ситуация характерна для изучения грамматики иностранного языка. Существует объективная сложность закрепления и совершенствования навыков в области основ грамматики при проведении только групповых аудиторных занятий с преподавателем, что обусловлено ограниченным временем на выполнение самостоятельных заданий, направленных на отработку и закрепление пройденного материала. Это остро ощущается при подготовке квалифицированных переводчиков. Повышение эффективности подготовки таких специалистов возможно за счет использования при изучении основ грамматики иностранного языка компьютерных обучающих программ — электронных учебных курсов.

С этой целью нами был создан и успешно используется в учебном процессе электронный учебный курс «Грамматика английского языка».

Структура электронного учебного курса и характеристика его функциональных подсистем

Электронный учебный курс (ЭУК) — это дидактическая компьютерная среда, содержащая систематизированный материал по соответствующей научно-практической области знаний (дисциплине), объединенная единой программной оболочкой. Применение ЭУК в образовательном процессе дает возможность использовать преимущества современных информационных образовательных технологий, таких как разнообразие форм представления учебных материалов, возможность их динамического отображения, оперативная «обратная связь», наглядность, сочетание текстовой, графической, аудио- и видеоинформации, для обеспечения информационной поддержки учебного процесса и самостоятельной работы обучающихся.

Электронный учебный курс как компьютерная обучающая программа может быть использован при любых формах обучения — очной, заочной, дистанционной. При этом ЭУК должен удовлетворять следующим общим требованиям:

- лично-ориентированная направленность обучения;
- интерактивный доступ к информации с возможностью «настройки» под текущий уровень подготовки обучающегося;
- сокращение до минимума ограничений обучающегося в его действиях и возможностях;
- возможность многократного использования для закрепления знаний и навыков обучающегося.

Содержательная составляющая ЭУК, как правило, формируется на основе авторской концепции изучения учебной дисциплины, а функционирование ЭУК связано с использованием базы мультимедийных данных, в которой обучающемуся доступен оперативный поиск необходимой информации. Как информационная система, ЭУК может реализовывать функции автоматизированных обучающих и контролируемых систем, моделирующих программ и других программных средств, используемых в информационной образовательной среде. При этом имеет место психолого-педагогический аспект создания ЭУК. С учетом преимущественного использования в индивидуальной и самостоятельной работе желателен выбор форм отображения информации и интерактивного доступа к ЭУК, обеспечивающих мотивацию обучающихся к самостоятельной учебной деятельности с помощью современных средств и возможностей информационных образовательных технологий.

При формировании навыков перевода с помощью разработанного ЭУК «Грамматика английского языка» в форме тестов отрабатывается работа с определенными грамматическими конструкциями. ЭУК формирует набор тестов, в которых каждый вопрос привязан к определенному грамматическому материалу. В том случае если обучающийся допускает ошибки при тестировании, ЭУК отсылает его к теоретическому материалу по тому разделу, где были допущены ошибки. Данный метод контроля позволяет не только выявить, но и сразу же устранить те или иные пробелы в знаниях грамматики, не прибегая к помощи преподавателя и без использования дополнительной литературы, поскольку в программу ЭУК уже заложены все необходимые теоретические материалы. По завершении занятия ЭУК выставляет обучающемуся оценку по традиционной четырехбалльной шкале.

Электронный учебный курс отвечает особенностям организации образовательного процесса современного высшего учебного заведения, реализующего государственные образовательные стандарты, где сочетаются различные формы обучения. Программная реализация ЭУК дает возможность работать в интерактивном режиме, обеспечивает легкость и простоту навигации по структуре курса. Структура и способ предоставления учебно-методических материалов в электронном виде легко варьируются в зависимости от конкретной формы их использования, обеспечивая поддержку персонализированных предметных сред в рамках лично-ориентированного принципа организации учебной деятельности.

Структура разработанного ЭУК в виде взаимосвязанных функциональных подсистем может рассматриваться как базовая для широкого клас-

са компьютерных обучающих систем, близких по решаемым учебным задачам. ЭУК включает три функциональные подсистемы: содержательную, информационно-навигационную и диагностирующую.

Содержательная подсистема является в ЭУК основной, его ядром, взаимосвязанным со всеми подсистемами с помощью прямой и обратной связей. Она состоит из элементов теоретического учебного материала, обеспечивающих информационную поддержку изучения дисциплины.

Информационно-навигационная подсистема является подчиненной по отношению к содержательной подсистеме и построена по принципу системы управления базами данных. Она включает следующую метаинформацию: структуру смысловых связей, аннотацию и структуру курса, справку, систему ссылок и поиска информации.

Диагностирующая подсистема также является подчиненной по отношению к содержательной подсистеме и обеспечивает контроль знаний и навыков обучающихся. Она формирует различные тесты для обучающихся и по результатам их выполнения выставляет обучающимся оценку.

Электронный учебный курс представляет собой автономную компьютерную программу, в которой выдержана определенная четкая структура функциональных подсистем с делением их на элементы (блоки). Это продиктовано двумя причинами:

— организационной — разбивка учебного материала в ЭУК на блоки не только облегчает его изучение в отсутствие преподавателя, но и позволяет регламентировать порядок взаимодействия обучающегося и преподавателя;

— функциональной — реализация гипертекстовых переходов при разработке и использовании ЭУК должна предполагать разграничение и обособленность его элементов [7].

Структура содержательной и диагностирующей подсистем ЭУК определяется сроком обучения, а структура информационно-навигационной подсистемы к сроку обучения не привязана, но по содержанию ее элементы согласуются с реализуемой в соответствующие сроки учебной программой.

В содержательной подсистеме ЭУК основной учебный материал структурируется по модулям и темам с отражением связей между ними. Можно утверждать, что усиление связи между модулями и темами ведет к повышению конечного результата обучения. Материал для углубленного изучения, а также вспомогательные сведения вынесены в дополнительный раздел — приложение. В приложении также представлен набор устойчивых выражений, позволяющий обучающемуся расширить лексический запас, с которым он может при желании ознакомиться.

Уровень полученных обучающимися знаний и навыков определяется в результате тестирования диагностирующей подсистемой ЭУК. Основной задачей тестирования является получение достоверных и объективных результатов о качестве усвоения обучающимися учебного материала и установление его соответствия требованиям. Оценка знаний по таким тестам осуществляется, как правило, в форме выбора правильного ответа из числа приведенных. Тестовая база по каждому модулю и теме соответствует содержанию учебной программы и входит в комплект методического обеспечения учебной дисциплины. В разработанном ЭУК может быть реализовано несколько режимов тестирования обучающихся:

- обучающимися — при самостоятельной подготовке, для самооценки знаний, умений и адаптации к подобной форме контроля знаний;
- преподавателем — для оценки качества усвоения обучающимися текущего материала и при необходимости повторения или разбора наиболее сложных и узловых вопросов («обратная связь»);
- преподавателем — для промежуточной и итоговой аттестации по дисциплине.

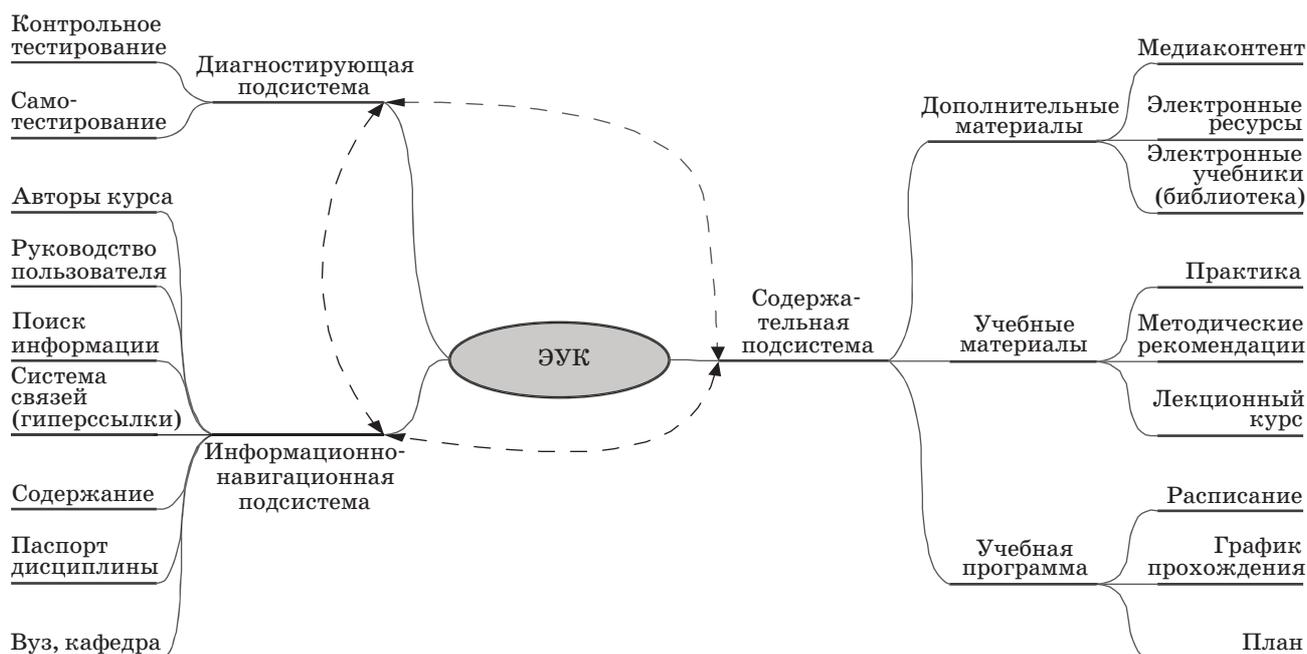
Особенностью тестирования в первых двух режимах является то, что обучающиеся могут не только выполнять тесты для контроля их знаний, но и сразу получают рекомендации по материалу, который потребует дополнительной отработки. Благодаря этому разработанный ЭУК оказывается свободен от недостатка, присущего большинству программ автоматизированного тестирования и заключающегося в том, что обучающиеся лишь в редких случаях получают комментарии по своим ошибкам.

Оценка знаний обучаемых в ЭУК выставляется в форме традиционных лингвистических значений по четырехбалльной шкале: «неудовлетворительно», «удовлетворительно», «хорошо» и «отлично». Алгоритм программы выставления оценки преобразует в лингвистическую оценку процент правильных ответов в соответствии с таблицей.

Концептуальная модель применения ЭУК (рисунок) отражает типовое распределение функций между функциональными подсистемами. Оно состоит в следующем.

Диагностирующая подсистема. Основное назначение данной подсистемы заключается в проведении тестирования знаний обучающихся.

Процент правильных ответов	Лингвистическая оценка
От 76 и выше	Отлично
От 51 до 75	Хорошо
От 26 до 50	Удовлетворительно
До 25	Неудовлетворительно



■ Концептуальная схема применения электронного учебного курса

С ее помощью осуществляются входное тестирование, выявляющее уровень знаний по иностранному языку в начале обучения (знание грамматики и лексики), и все виды контроля усвоения пройденного материала в процессе изучения иностранного языка (текущий, промежуточный и итоговый). Данный способ проверки знаний на разных этапах процесса обучения помогает выявить темы, вызывающие трудности, и скорректировать дальнейший план изучения дисциплины.

Содержательная подсистема. В данной подсистеме размещается весь учебный и дополнительный материал, включая основные пункты учебной программы (очередность тем и график их прохождения). Используя данную информационную базу на практических занятиях, обучающиеся могут быстро найти теоретический материал, необходимый для изучения любой грамматической темы, а также имеют быстрый доступ к лексическим спискам и словарю.

Информационно-навигационная подсистема. Основные функции данной подсистемы связаны с тем, что изучение иностранного языка требует постоянного закрепления пройденного материала. Поэтому ЭУК должен предоставлять возможность быстрого постраничного доступа к материалу по разделам и темам, повторного обращения к информации, использования справочников и словарей с быстрым поиском по ключевому слову или словосочетанию.

Отметим дидактические принципы, которым должна удовлетворять разработка ЭУК для обучения иностранному языку.

Принцип научности изложения. Особое внимание этому принципу следует уделять при подготовке специалистов для переводческой деятельности в сфере профессиональной коммуникации, так как получение хорошей грамматической и лексической базы является основой дальнейшего совершенствования навыков перевода. При этом представление материала на разных уровнях изложения способствует повышению мотивации работы с ЭУК для обучающихся с разным уровнем подготовленности и заинтересованности.

Принцип системности. Учебный материал разбивается на темы, несколько тем группируются в главы, связь между темами осуществляется посредством введения гиперссылок, особое внимание уделяется связи данной дисциплины с другими дисциплинами, а также раскрытию значения изучения дисциплины для будущей профессиональной деятельности. Тем самым реализуется принятая методика изучения учебного материала и одновременно повышается интерес обучающихся к будущей профессиональной деятельности.

Принцип доступности. Необходимо обеспечить благоприятные условия для восприятия учебного материала обучающимися и возможность непрерывно повышать уровень своей подготовки при использовании ЭУК. Для этого в ЭУК наряду с основным (обязательным для освоения) материалом включается дополнительный материал, а также контрольные вопросы и упражнения, которые способствуют более глубокому усвоению материала.

Принцип наглядности. Теоретический материал и тестовые задания, включаемые в ЭУК, должны содержать достаточное количество примеров, поясняющих отдельные фрагменты изучаемого материала. При оформлении электронного материала необходимо уделять внимание форме и стилю представления материала, включая выбор шрифтов, цветовую гамму, оформление экранных форм, а также удобству работы с программой (создание «дружественного интерфейса»).

Указанные принципы легли в основу при разработке ЭУК «Грамматика английского языка». При этом возможности компьютерной обучающей программы ЭУК использовались следующим образом:

- для организации различных видов тестирования знаний обучающихся;
- для организации самостоятельного процесса изучения грамматики английского языка в объеме учебной программы;
- как дополнительное средство факультативного изучения грамматики английского языка.

Результаты апробации ЭУК и разработанной методики его применения в учебном процессе показали, что сформированные на базе использования ЭУК педагогические условия способствуют:

- улучшению текущей успеваемости обучающихся;
- увеличению объема изучаемого материала;
- повышению уровня готовности обучающихся к самостоятельному изучению иностранного языка.

Использование ЭУК также позволило повысить интерес к изучаемой предметной области, показало положительное отношение обучающихся к электронным средствам обучения и тесную взаимосвязь между решением прикладной задачи и средствами, методами ее решения [8].

Литература

1. Андерсен Бенгт. Б., Катя ван ден Бринк. Мультимедиа в образовании: специализированный учеб. курс: пер. с англ. — М.: Дрофа, 2007. — 221 с.
2. Киселев Г. М., Бочкова Р. В. Информационные технологии в педагогическом образовании: учеб. пособие. — М.: Дашков и К, 2013. — 308 с.
3. Григорьев С. Г., Гриншкун В. В. Информатизация образования. Фундаментальные основы. — М.: МГПУ, 2005. — 231 с.
4. Захарова И. Г. Информационные технологии в образовании: учеб. пособие. — М.: Академия, 2003. — 186 с.
5. Советов Б. Я., Цехановский В. В. Информационные технологии: учеб. для вузов. — М.: Высш. шк., 2006. — 263 с.

Заключение

Интеграция традиционных методов обучения и современных электронных образовательных технологий позволяет существенно повысить качество профессиональной подготовки, важным компонентом которой является внедрение в процесс обучения электронных курсов учебных дисциплин. В настоящей работе обоснована структура компьютерных обучающих программ для изучения иностранного языка и изложен опыт разработки и применения авторского ЭУК «Грамматика английского языка». В структуре ЭУК выделены три функциональные подсистемы: содержательная, информационно-навигационная и диагностирующая — и приведено типовое распределение функций между ними. Выбор для реализации компьютерной обучающей системы именно грамматики иностранного языка обусловлен особенностями подготовки специалистов для осуществления переводческой деятельности в сфере профессиональной коммуникации, которые для постоянного применения знаний иностранного языка должны в совершенстве обладать навыками в области основ грамматики.

Результаты работы могут быть использованы при создании новых компьютерных обучающих программ для изучения грамматики и лексики иностранных языков, а также при совершенствовании общей педагогической системы в целом. Апробация разработанного ЭУК «Грамматика английского языка» показала повышение эффективности изучения иностранного языка.

Электронный учебный курс «Грамматика английского языка» опубликован в электронной библиотеке системы федеральных образовательных порталов. Ознакомиться с ним можно по адресу: <http://window.edu.ru/window/library>.

6. Русанов О. В., Сиговцев Г. С. Об архитектуре адаптивного гипермедиа учебного ресурса // Информационные технологии в образовании: тр. XIV Междунар. конф. М., 2004. Ч. IV. С. 195–198.
7. Панюкова С. В. Использование информационных и коммуникационных технологий в образовании. — М.: Академия, 2010. — 224 с.
8. Прокофьева А. Л. Использование электронного учебного курса для самостоятельной работы по иностранному языку курсантов с целью повышения успеваемости // Изв. Рос. гос. пед. ун-та им. А. И. Герцена. Психолого-педагогические науки. 2011. № 129. С. 173–176.

UDC 378.15

doi:10.15217/issn1684-8853.2015.6.98

E-study Courses for Studying Foreign Language at Higher Education EstablishmentsProkofieva A. L.^a, Senior Lecturer, a_prokofieva@mail.ru^aA. F. Mozhaiskii Military Space Academy, 13, Zhdanovskaia St., 197198, Saint-Petersburg, Russian Federation

Purpose: The goal of this work is the substantiation of e-study course efficiency when studying a foreign language at higher education establishments in order to advance the passed material and skills in grammar. **Results:** A general approach is introduced to the development of foreign language courseware structure as mutually connected functional subsystems. Practical recommendations are given for using an e-study course while training language specialists. The suggested courseware contains three subsystems, responsible for information/navigation, contents and diagnostics. **Practical relevance:** Using the proposed e-study course ‘The English Grammar’ considerably speeds up the acquisition of grammar as compared to the traditional methods of teaching foreign languages based on group class exercises with a teacher.

Keywords — Informational Education Technologies, Computer Courseware, E-study Course, Knowledge Testing.

References

1. Andersen Bent. B., Kate van den Brink. *Mul'timedia v obrazovanii* [Multimedia in Education]. Moscow, Drofa Publ., 2007. 221 p. (In Russian).
2. Kiselev G. M. *Informatsionnye tekhnologii v pedagogicheskoi obrazovanii* [Information Technologies in Pedagogical Education]. Moscow, Dashkov i K Publ., 2013. 308 p. (In Russian).
3. Grigor'ev S. G., Grinshkun V. V. *Informatizatsia obrazovaniia. Fundamentalnye osnovy* [Informatization of Education. Fundamentals]. Moscow, MGPU Publ., 2005. 231 p. (In Russian).
4. Zakharova I. G. *Informatsionnye tekhnologii v obrazovanii* [Information Technologies in Education]. Moscow, Academia Publ., 2003. 186 p. (In Russian).
5. Sovetov B. Ia., Tchanovskiy V. V. *Informatsionnye tekhnologii* [Information Technologies]. Moscow, Vysshaia shkola Publ., 2006. 263 p. (In Russian).
6. Rusanov V., Sigovtsev G. S. About Architecture of the Adaptive Hypermedia Educational Resource. *Trudy XIV Mezhdunarodnoi konferentsii "Informatsionnye tekhnologii v obrazovanii"* [Proc. XIV Int. Conf. "Information Technology and Learning"]. Moscow, 2004, part IV, pp. 195–198 (In Russian).
7. Paniukova S. V. *Ispol'zovanie informatsionnykh i kommunikatsionnykh tekhnologii v obrazovanii* [Use of Information and Communication Technologies in Education]. Moscow, Academia Publ., 2010. 224 p. (In Russian).
8. Prokof'eva A. L. Information Technologies in the Course of Self-Directed Learning Aimed at Cadets' Academic Progress in Studying Foreign Language. *Izvestiia Rossiiskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta im. A. I. Gertsena. Psikhologo-pedagogicheskie nauki*, 2011, no. 129, pp. 173–176 (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.

ЭВРИСТИЧЕСКИЙ МЕТОД РЕШЕНИЯ МНОГОПРОДУКТОВОЙ ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ ЗАПАСАМИ

Е. С. Чугунов^а, аспирант

В. В. Захаров^а, доктор физ.-мат. наук, профессор

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

Постановка задачи: оптимизация управления запасами играет ключевую роль в уменьшении издержек практически любой современной компании. Обычно рассматривается ситуация, когда поставщик доставляет одному или нескольким ритейлерам товары различных видов за несколько партий. Целью работы является разработка метода решения задачи управления запасами, позволяющего минимизировать суммарные затраты поставщика и ритейлеров. **Результаты:** для решения задачи управления запасами, описанной с помощью многопродуктовой модели, предложен новый эвристический метод. Новизна метода состоит в том, что рассматриваются все допустимые временные интервалы между поставками. Для каждого варианта временного интервала определяются объемы товаров в одной партии и затем из всех допустимых вариантов временных интервалов между поставками выбирается тот, при котором суммарные издержки поставщика и ритейлера будут минимальными. Проведен сравнительный анализ данного метода с двумя разработанными ранее эвристическими методами решения поставленной задачи. Показано, что предложенный эвристический метод в большинстве случаев дает лучшее решение, чем два других метода. **Практическая значимость:** предложенный эвристический метод решения задачи управления запасами, описанной с помощью многопродуктовой модели, позволит разрабатывать новые методы и компьютерные программы для оптимизации складской работы многих компаний.

Ключевые слова — задача управления запасами, однопродуктовая модель, многопродуктовая модель, нелинейное программирование, эвристический метод, Vendor Managed Inventory.

Введение

В современном экономическом мире практически все компании сталкиваются с проблемами, связанными с заказом и хранением различных грузов, а также минимизацией соответствующих затрат. В математическом контексте данные проблемы можно отнести к задачам оптимизации цепей поставок [1, 2], в которые могут входить поставщики, производители, склады, перевозчики, ритейлеры (продавцы, торговые сети) и конечные потребители. Для решения данных задач разрабатываются различные экономические и математические модели. В частности, особое внимание уделяется разработке новых концепций систем управления запасами, учитывающих финансовые риски [3–7].

Большинство моделей изначально разрабатывалось для проведения различных научных исследований, и многие из них нельзя использовать в практических расчетах, так как они не могут описать в полной мере все ограничения производственных циклов на большинстве современных предприятий. В связи с этим разработка адаптированных под современный экономический рынок моделей и методов их решения является актуальной. В процессе математической формализации, учитывающей специфические ограничения, модели приобретают большую размерность. Для достижения приемлемого времени нахождения решения разрабатываются различные эвристические алгоритмы, которые

в большинстве случаев дают приближенные решения.

Многие специалисты используют концепцию Vendor Managed Inventory (VMI) [8, 9]. В данной модели ритейлер предоставляет информацию поставщику об уровне своих продаж и уровне запасов определенного товара на своем складе. Поставщик, учитывая данную информацию, определяет объем и количество партий данного товара, которые будут доставлены в течение периода планирования. Основной целью данной задачи является минимизация издержек ритейлера и поставщика на оформление заказов, покупку и хранение товара на складе у ритейлера. При этом в зависимости от количества различных товаров в одной партии возможны однопродуктовая [10] и многопродуктовая [11] математические записи модели.

В то же время количество участников в данной задаче может быть не ограничено только одним поставщиком и ритейлером, возможны и другие варианты: несколько поставщиков — несколько клиентов, один поставщик — несколько клиентов, несколько поставщиков — один клиент, а также всевозможные варианты кооперации участников.

Концепцию VMI можно разделить на 2 класса:

— модель экономического размера заказа [12], в которой в момент поступления заказа поставщик имеет в наличии товар в необходимом объеме;

— модель экономического объема производства, в которой в момент поступления заказа постав-

щик не имеет в наличии товар в необходимом объеме [13, 14].

Рассматриваемая задача относится к классу выпуклых смешанно-целочисленных нелинейных задач оптимизации и является NP-сложной [15–17].

Для решения данной задачи, описанной с использованием однопродуктовой (поставщик за одну поставку доставляет товары только одного вида) и многопродуктовой (поставщик за одну поставку доставляет товары сразу нескольких видов) моделей, применяются различные методы: метод внешней аппроксимации [18], метод обобщенной декомпозиции [19, 20], расширенный метод секущих плоскостей [18], LP/NLP метод [21, 22]. Также существуют различные эвристические методы, например, в статье [10] авторы предлагают использовать разработанный ими эвристический метод для однопродуктовой модели, основанный на методе множителей Лагранжа, а в статье [23] предлагается использовать муравьиный (генетический) алгоритм для решения однопродуктовой модели.

В настоящей статье предложен эвристический метод решения поставленной задачи и произведен сравнительный анализ эффективности предложенного метода с двумя другими методами решения, разработанными ранее.

Математические модели задачи управления запасами

Однопродуктовая модель

Рассмотрим модель VMI «один поставщик — один ритейлер» [24]. Поставщик поставяет ритейлеру n различных товаров. У ритейлера есть детерминированный спрос в размере D_j на j -й товар ($j = 1, 2, \dots, n$), равномерно распределенный в течение периода T . Дефицит товаров у ритейлера допускается и учитывается в виде дополнительных затрат (штрафов). Цены на все виды товаров считаются фиксированными в течение периода T . У ритейлера имеется ограничение на вместимость склада для хранения всех видов товаров. Ритейлер оформляет заказы на товары в течение периода планирования T . Товар вида j доставляется ритейлеру через равные промежутки времени и в одинаковом объеме Q_j , удовлетворяя спрос D_j в течение периода планирования T . В одной партии доставляются товары только одного вида.

Затраты ритейлера состоят из расходов на оформление заказов по доставке товаров; на покупку товаров в необходимом объеме; на хранение товаров в течение всего периода планирования, а также денежных штрафов за дефицит товаров.

Ритейлер минимизирует свои затраты за счет выбора Q_j — количества товара вида j в одной

партии и уровня допустимого дефицита b_j товара вида j .

Целевая функция, описывающая расходы ритейлера в случае однопродуктовых партий, имеет вид

$$Z = \sum_{j=1}^n \left[\frac{D_j}{Q_j} (A_{Sj} + A_{Rj}) + \frac{h_j}{2Q_j} (Q_j - b_j)^2 + \frac{\hat{\pi} b_j^2}{2Q_j} + \frac{\pi b_j D_j}{Q_j} \right] \rightarrow \min_{Q_j, b_j} \quad (1)$$

где n — количество различных видов товаров в заказываемой партии; $j = 1, 2, \dots, n$ — виды товаров; D_j — объем спроса на товар вида j в течение периода планирования T ; Q_j — объем заказа товара вида j в каждой партии; A_{Sj} — фиксированные издержки поставщика на размещение заказа партии товара вида j ; A_{Rj} — фиксированные издержки ритейлера на размещение заказа партии товара вида j ; h_j — издержки ритейлера на хранение единицы товара вида j в течение всего периода планирования T ; b_j — уровень дефицита товара вида j в промежутке времени между поставками; $\hat{\pi}$ — затраты от объема дефицита у ритейлера в размере единицы товара в течение всего периода планирования T ; π — фиксированный штраф за суммарный объем дефицита в размере единицы товара в каждом из промежутков между поставками (циклов); $\frac{D_j}{Q_j} (A_{Sj} + A_{Rj})$ — суммарные затраты ритейлера и поставщика на оформление всех заказов по доставке товара вида j в течение периода T ; $\frac{h_j}{2Q_j} (Q_j - b_j)^2$ — затраты ритейлера на хранение товара вида j на своем складе в течение всего периода планирования T ; $\frac{\hat{\pi} b_j^2}{2Q_j}$ — издержки от дефицита товара вида j на складе ритейлера в течение периода планирования T ; $\pi b_j \frac{D_j}{Q_j}$ — фиксированный штраф за суммарный объем дефицита товара вида j в размере b_j в каждом из циклов между поставками.

При этом у ритейлера есть ряд ограничений:

— ограничение на вместительность склада зададим следующим образом:

$$\sum_{j=1}^n f_j (Q_j - b_j) \leq F; \quad (2)$$

— ограничение на максимальное количество заказов:

$$\sum_{j=1}^n \frac{D_j}{Q_j} \leq M; \quad (3)$$

— дефицит товара у ритейлера не может быть больше поставляемого объема:

$$b_j \leq Q_j, j = 1, 2, \dots, n; \quad (4)$$

— объем заказа товара вида j в каждой партии не может принимать отрицательные, нулевые и дробные значения, а также превосходить объем спроса на данный товар в течение всего периода планирования T :

$$0 < Q_j \leq D_j, \quad Q_j \in \mathbb{Z}, \quad j = 1, 2, \dots, n; \quad (5)$$

— уровень дефицита товара вида j также не может принимать отрицательные и дробные значения:

$$b_j \geq 0, \quad b_j \in \mathbb{Z}, \quad j = 1, 2, \dots, n, \quad (6)$$

где f_j — пространство склада, занимаемое единицей товара вида j ; F — общее доступное пространство склада ритейлера для размещения всех видов товаров; M — максимально допустимое общее количество заказов для всех видов товаров.

Вектором переменных данной математической модели будет вектор $(b_1, \dots, b_n, Q_1, \dots, Q_n)$.

В данной математической модели нет ограничения на целочисленность значения количества партий.

Многопродуктовая модель

В данной математической модели поставщик в одной партии может поставить ритейлеру товаров сразу всех n типов.

Ритейлер минимизирует свои затраты (оформление заказов, покупка товаров, хранение товаров на складе, штрафы за дефицит товаров) за счет выбора Q_j — количества товара вида j в одной партии, уровня допустимого дефицита b_j товара вида j , а также количества партий со всеми товарами в течение всего периода планирования T .

Пусть $\tau \in (0, T]$ — длина цикла (временного промежутка между поставками), измеряемая в долях периода планирования T ; $\frac{T}{\tau}$ — количество поставок за период планирования T . Далее будем предполагать, что $T = 1$ (1 неделя, 1 месяц, 1 год).

Введя τ , мы можем выразить Q_j через τ и D_j с учетом требования целочисленности значения Q_j :

$$Q_j = \begin{cases} D_j \tau, & \text{если } D_j \tau \in \mathbb{Z}; \\ [D_j \tau] + 1, & \text{если } D_j \tau \notin \mathbb{Z}, \end{cases} \quad (7)$$

где $[D_j \tau]$ — целая часть от $D_j \tau$.

Введение значения $Q_j = [D_j \tau] + 1$ обусловлено рациональным условием, что поставщик не может доставлять в каждой партии товар вида j в объеме меньше, чем $D_j \tau$, так как в противном случае он не сможет удовлетворить в полном объеме спрос ритейлера.

Целевая функция, описывающая расходы ритейлера в случае многопродуктовых партий, имеет вид

$$Z = \left(\frac{1}{\tau} \right) (A_S + A_R) + \sum_{j=1}^n \left(\frac{(Q_j - b_j)^2 h_j}{2Q_j} + \frac{\hat{\pi} b_j^2}{2Q_j} \right) + \frac{\pi}{\tau} \sum_{j=1}^n b_j \rightarrow \min_{\tau, Q_j, b_j} \quad (8)$$

при условии (7).

Функция общих затрат, подлежащая минимизации, имеет отличные от целевой функции (1) формулы определения затрат поставщика и ритейлера на оформление заказов: $\left(\frac{1}{\tau} \right) (A_S + A_R)$,

где A_S — фиксированные издержки поставщика на размещение заказа многопродуктовой партии; A_R — фиксированные издержки ритейлера на размещение заказа многопродуктовой партии, а также фиксированного штрафа за суммарный объем дефицита товара вида j в размере b_j в каждом из циклов: $\frac{1}{\tau} \sum_{j=1}^n \pi b_j$.

В данном случае ритейлер также имеет ряд ограничений:

— ограничение на доступное пространство склада:

$$\sum_{j=1}^n f_j (Q_j - b_j) \leq F; \quad (9)$$

— дефицит товара у ритейлера не может быть больше поставляемого объема:

$$b_j \leq Q_j, \quad j = 1, 2, \dots, n; \quad (10)$$

— уровень дефицита товара вида j не может принимать отрицательные значения:

$$b_j \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, n; \quad (11)$$

— уровень дефицита товара вида j не может принимать дробные значения:

$$b_j \in \mathbb{Z}, \quad j = 1, 2, \dots, n; \quad (12)$$

— ограничение на количество поставок:

$$1 \leq \frac{1}{\tau} \leq M; \quad (13)$$

— длина цикла (временной промежуток между поставками) может принимать только положительные вещественные значения:

$$\tau \in (0, T], \quad \tau \in \mathbb{R}; \quad (14)$$

— количество поставок за весь период должно быть целым числом:

$$\frac{1}{\tau} \in \mathbb{Z}. \quad (15)$$

Вектором переменных в данной математической модели будет вектор $(\tau, b_1, \dots, b_n, Q_1, \dots, Q_n)$.

Эвристический метод

Для решения задачи управления запасами, описанной с помощью многопродуктовой модели (8)–(15), мы предлагаем сначала определить все допустимые значения τ , далее для каждого допустимого значения τ определить целочисленные значения переменных Q_j и частично целочисленные значения переменных b_j . Среди всех наборов значений переменных τ , Q_j , b_j выбрать оптимальный набор, при котором целевая функция (8) принимает наименьшее значение.

Если некоторые из переменных b_j принимают нецелочисленные значения, необходимо решить относительно этих переменных целочисленную задачу с помощью метода ветвей и границ.

В результате данной последовательности действий будут найдены нецелочисленное значение переменной τ и целочисленные значения переменных Q_j и b_j , при которых целевая функция (8) будет принимать наименьшее значение.

Алгоритм метода:

Шаг 1. Определим все значения τ , удовлетворяющие ограничениям (13)–(15).

Шаг 2. Для каждого фиксированного значения τ определяем значения переменных (7).

Шаг 3. Целевая функция (8) и ограничения (9)–(11) удовлетворяют условиям теоремы Куна — Таккера [25] о существовании локального минимума в задаче нелинейного программирования. Используя данную теорему, для выбранного значения τ и соответствующих ему значений Q_j находим оптимальные значения переменных b_j .

В ограничении рассмотрим случаи равенства (9) $F - \sum_{j=1}^n f_j(Q_j - b_j) = 0$, для которых решается система уравнений

$$\frac{\partial Z}{\partial b_j} = \alpha \frac{\partial \left(F - \sum_{j=1}^n f_j(Q_j - b_j) \right)}{\partial b_j}, \quad j = 1, 2, \dots, n.$$

Отсюда

$$b_j = \frac{\alpha f_j Q_j + h_j Q_j - \pi \frac{Q_j}{\tau}}{h_j + \hat{\pi}};$$

$$\alpha = \frac{\sum_{j=1}^n \frac{D_j f_j \pi + Q_j f_j \hat{\pi}}{h_j + \hat{\pi}} - F}{\sum_{j=1}^n \frac{f_j^2 Q_j}{h_j + \hat{\pi}}}, \quad j = 1, 2, \dots, n.$$

Если для найденных таким образом значений переменных b_j ограничения (10)–(12) выполняются, то оптимальное решение найдено и алгоритм

останавливается. Если выполняются только ограничения (10) и (11), то переходим к шагу 4.

Для ограничений (10) и (11) решение дополнительных систем не требуется, так как в случае равенства эти ограничения сразу определяют значения переменных: $b_j = Q_j$ и $b_j = 0$ соответственно.

Шаг 4. Для каждого значения τ и соответствующих ему значений переменных b_j определяем значение целевой функции (8).

Шаг 5. Среди всех полученных на шаге 4 значений целевой функции (8) выбираем наименьшее, которое достигается при $\tau = \tau^*$.

Шаг 6. Все действия останавливаются.

Сравнительный анализ методов

Связь фиксированных издержек на оформление заказа поставщика и ритейлера в однопродуктовой (1)–(6) и многопродуктовой (8)–(15) моделях можно выразить как

$$A_S = q_1 \sum_{j=1}^n A_{Sj}; \quad A_R = q_2 \sum_{j=1}^n A_{Rj},$$

где q_1 и q_2 — коэффициенты ($q_1 > 0$, $q_2 > 0$).

Сравнительный анализ эффективности предложенного эвристического метода задачи управления запасами, описанной с использованием многопродуктовой модели, с эвристическим [10] и генетическим [23] методами решения задачи управления запасами, описанной с помощью однопродуктовой модели, проводился на 10 наборах численных примеров. В каждом наборе параметры A_{Sj} , A_{Rj} , D_j , h_j , f_j , M , F имели фиксированные, а параметры $\hat{\pi}$, π — различные значения.

Принималось условие равенства фиксированных издержек на оформление заказа для поставщика и ритейлера в многопродуктовой модели суммарным издержкам на оформление заказов для поставщика и ритейлера в однопродуктовой модели, т. е. $q_1 = 1$, $q_2 = 1$.

Сравнение методов проводилось по значениям целевых функций однопродуктовой и многопродуктовой моделей, применяемых для описания задачи управления запасами. Время работы ал-

■ Таблица 1*

Товар j	D_j	h_j	f_j	A_{Sj}	A_{Rj}
1	420	4	3	10	7
2	360	9	2	8	6
3	540	7	3	9	8
4	390	2	1	10	6
5	480	4	4	7	7

* $F = 18\,000$; $M = 12$.

■ Таблица 2

	$\hat{\pi}$								Метод*
	0,25	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50	1,75	2,00	
0,00	352,1	450,2	537,1	615,5	686,9	752,6	813,1	869,0	M1
	342,3	451,9	538,5	614,7	685,1	753,8	812,5	864,3	M2
	346,2	466,1	548,8	601,1	695,04	753,2	815,8	878,7	M3
0,25	832,2	905,5	970,4	1029,3	1083,2	1132,9	1178,8	1221,5	M1
	822,7	912,7	969,0	1031,4	1054,4	1082,8	1106,3	1128,3	M2
	837,4	910,1	985,7	1012,3	1078,8	1101,8	1160,5	1162,9	M3
0,50	1232,6	1289,4	1338,0	1381,6	1421,5	1458,1	1492,2	1523,8	M1
	1243,8	1278,9	1302,4	1319,6	1335,6	1349,7	1358,3	1366,5	M2
	1252,2	1302,1	1338,2	1352,6	1387,5	1417,9	1413,2	1448,1	M3

* M1 — предложенный эвристический метод решения задачи управления запасами, описанной с помощью многопродуктовой модели; M2 — эвристический метод [10] решения задачи управления запасами, описанной с помощью однопродуктовой модели; M3 — генетический метод [23] решения задачи управления запасами, описанной с помощью однопродуктовой модели.

горитмов не учитывалось, так как оно зависит от вычислительной мощности компьютеров и способа реализации алгоритмов.

Пример. Исходные данные для одного набора численных примеров приведены в табл. 1.

Значения целевых функций, полученные с использованием рассматриваемых методов, приведены в табл. 2.

Из полученных данных следует, что при заданных наборах параметров и значениях $q_1 = 1$, $q_2 = 1$ использование предложенного эвристического метода решения задачи управления запасами в 20 случаях из 24 дает лучшее решение, чем использование двух других методов. При этом в эвристическом [10] и генетическом [23] алгоритмах не учитывается условие, что количество партий каждого товара, доставляемых поставщиком ритейлеру в течение периода планирования T , должно принимать только целочисленные значения. Если учитывать данное условие, то это приведет к увеличению значения целевой функции.

В других девяти наборах численных примеров в большинстве случаев предложенный метод так-

же дает лучшее решение, чем эвристический [10] и генетический [23] методы.

Заключение

В работе описаны однопродуктовая и многопродуктовая модели задачи управления запасами. С точки зрения оптимизации многопродуктовая модель имеет преимущество перед однопродуктовой моделью, так как при больших значениях n использование многопродуктовой модели позволяет существенно сократить размерности задач и, как следствие, скорость и время работы методов их решения.

В работе также был предложен эвристический метод решения задачи управления запасами, описанной с помощью многопродуктовой модели.

Проведенный сравнительный анализ методов показал, что при $q_1 = 1$, $q_2 = 1$ предложенный эвристический метод в большинстве случаев дает лучшее решение, чем эвристический [10] и генетический [23] методы решения задачи управления запасами. Естественно, при $q_1 < 1$, $q_2 < 1$ этот вывод также будет справедлив.

Литература

1. Mohebbi E. A Note on a Production Control Model for a Facility with Limited Storage Capacity in a Random Environment // European Journal of Operational Research. 2008. Vol. 190. P. 562–570.
2. Axsater S. Inventory Control. — Boston, USA: Kluwer Academic Publishers, 2000. — 202 p.
3. Axsater S. A Framework for Decentralized Multi-Echelon Inventory Control // Journal Springer. 2001. Vol. 33. P. 91–97.

4. Moinzadeh K. A Multi-Echelon Inventory System with Information Exchange // Journal Management Science. 2002. Vol. 48. P. 414–426.
5. Zipkin P. H. Foundations of Inventory Management. — Boston, USA: McGraw — Hill Higher Education, 2000. — 514 p.
6. Chopra S., Meindl P. Supply Chain Management: Strategy, Planning, Operation. 1st ed. — Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall, 2001. — 543 p.
7. Анисимов В. Г. и др. Введение в экономический риск-менеджмент/ В. Г. Анисимов, Е. Г. Анисимов,

- А. П. Бойко, О. В. Калинина, В. А. Карпов, Е. В. Лобас. — М.: РИО ПТА, 2008. — 92 с.
8. **Cheung L., Lee H. L.** The Inventory Benefit of Shipment Coordination and Stock Rebalancing in a Supply Chain // *Journal Management Science*. 2002. Vol. 48(2). P. 300–306.
 9. **Disney S. M., Towill D. R.** The Effect of Vendor Managed Inventory (VMI) Dynamics on the Bullwhip Effect in Supply Chains // *International Journal of Production Economics*. 2003. Vol. 85. P. 199–215.
 10. **Cardenas-Barron L. E., Trevino-Garza G., Wee H. M.** A Simple and Better Algorithm to Solve the Vendor Managed Inventory Control System of Multi-Product Multi-Constraint Economic Order Quantity Model // *Journal Expert Systems with Applications*. 2012. Vol. 39(3). P. 3888–3895.
 11. **Рыжиков Ю. И.** Теория очередей и управление запасами. — СПб.: Питер, 2001. — 376 с.
 12. **Лукинский В. В.** Актуальные проблемы формирования теории управления запасами. — СПб.: СПбГИЭУ, 2008. — 213 с.
 13. **Silver E. A., Pyke D. F., Peterson R.** Inventory Management and Production Planning and Scheduling. 3rd ed. — N. Y., NY, USA: John Wiley and Sons, 1998. — 737 p.
 14. **Tersine R. J.** Principles of Inventory and Materials Management. 4th ed. — Englewood Cliffs, NJ, USA: Prentice Hall PTR, 1994. — 591 p.
 15. **Leyffer S.** Deterministic Methods for Mixed Integer Nonlinear Programming: PhD Thesis. — Dundee, USA: Department of Mathematics & Computer Science, University of Dundee, 1993. — 117 p.
 16. **Алексеев А. О.** и др. Применение цепей Маркова к оценке вычислительной сложности симплексного метода / А. О. Алексеев, О. Г. Алексеев, В. Г. Анисимов, Е. Г. Анисимов, Н. И. Ячкула // *Изв. Российской академии наук. Теория и системы управления*. 1988. № 3. С. 59–63.
 17. **Анисимов В. Г., Анисимов Е. Г.** Метод решения одного класса задач целочисленного программирования // *Журнал вычислительной математики и математической физики*. 1989. Т. 29. № 10. С. 1586–1590.
 18. **Duran M., Grossmann I.** An Outer-Approximation Algorithm for a Class of Mixed-Integer Nonlinear Programs // *Journal Mathematical Programming*. 1986. Vol. 36. P. 307–339.
 19. **Geoffrion A.** Generalized Benders Decomposition // *Journal Optimization Theory and Applications*. 1972. Vol. 10. P. 237–260.
 20. **Benders J.** Partitioning Procedures for Solving Mixed-Variables Programming Problems // *Computational Management Science*. 2005. Vol. 2. Iss. 1. P. 3–19.
 21. **Westerlund T., Pettersson F.** A Cutting Plane Method for Solving Convex MINLP Problems // *Journal Computers & Chemical Engineering*. 1995. Vol. 19. P. 131–136.
 22. **Quesada I., Grossmann I.** An LP/NLP Based Branch and Bound Algorithm for Convex MINLP Optimization Problems // *Journal Computers & Chemical Engineering*. 1992. Vol. 16. P. 937–947.
 23. **Seyed Hamid Reza Pasandideh, Seyed Taghi Akhavan Niaki, Ali Roozbeh Nia.** A Genetic Algorithm for Vendor Managed Inventory Control System of Multi-Product Multi-Constraint Economic Order Quantity Model // *Journal Expert Systems with Applications*. 2011. Vol. 3. P. 2008–2716.
 24. **Гасратов М. Г., Захаров В. В.** Теоретико-игровые модели оптимизации цепочки поставок для детерминированного спроса // *Математическая теория игр и ее приложения*. 2011. № 1. С. 23–59.
 25. **Kuhn H. W., Tucker A. W.** Nonlinear Programming // *Proc. of 2nd Berkeley Symp.* Berkeley, USA: University of California Press, 1951. P. 481–492.

UDC 519.874.2

doi:10.15217/issn1684-8853.2015.6.105

Heuristic Method for Solving Multi-Product Inventory Routing ProblemChugunov E. S.^a, Post-Graduate Student, mail@evgenius.orgZakharov V. V.^a, Dr. Sc., Phys.-Math., Professor, mcvector@mail.ru^aSaint-Petersburg State University, 35, Universitetskii Pr., 198504, Peterhof, Saint-Petersburg, Russian Federation

Purpose: Inventory management optimization is critical for reducing the expenses of almost every modern company. The most common situation is when the supplier delivers goods of different types to one or several retailers in several consignments. The goal of this work is finding a method to solve the inventory management problem which would minimize the total expenses of the supplier and the retailers. **Results:** A new heuristic method is proposed to solve the inventory routing problem described by a multi-product model. The novelty of the approach is that all the feasible time intervals between the deliveries are considered. First, the amount of goods in one consignment is determined for each time interval variant. Then, out of all the variants, we choose the one in which the total expenses of the supplier and retailers are the smallest. An efficiency analysis of this method in comparison with two other heuristic methods was performed. It has been shown that the proposed heuristic method in most cases provides a better solution than the other two. **Practical relevance:** The proposed heuristic method for solving the inventory routing problem described by a multi-product model will allow you to develop new approaches and new software for the optimization of inventory routing in many companies.

Keywords — Inventory Routing Problem, Single-Product Model, Multi-Product Model, Nonlinear Programming, Heuristic Method, Vendor Managed Inventory.

References

1. Mohebbi E. A Note on a Production Control Model for a Facility with Limited Storage Capacity in a Random Environment. *European Journal of Operational Research*, 2008, no. 190, pp. 562–570.
2. Axsater S. *Inventory Control*. Boston, USA, Kluwer Academic Publishers, 2000. 202 p.
3. Axsater S. A Framework for Decentralized Multi-Echelon Inventory Control. *Journal Springer*, 2001, no. 33, pp. 91–97.
4. Moinzadeh K. A Multi-Echelon Inventory System with Information Exchange. *Journal Management Science*, 2002, no. 48, pp. 414–426.
5. Zipkin P. H. *Foundations of Inventory Management*. Boston, USA, McGraw — Hill Higher Education, 2000. 514 p.
6. Chopra S., Meindl P. *Supply Chain Management: Strategy, Planning, Operation*. Upper Saddle River, NJ, USA, Prentice Hall, 2001. 543 p.
7. Anisimov V. G., Anisimov E. G., Boiko A. P., Kalinina O. V., Karpov V. A., Lobas E. V. *Vvedenie v ekonomicheskii risk-menedzhment* [Introduction to the Economic Risk-Management]. Moscow, Rossiiskaia tamozhennaia akademiia Publ., 2008. 92 p. (In Russian).
8. Cheung L., Lee H. L. The Inventory Benefit of Shipment Coordination and Stock Rebalancing in a Supply Chain. *Journal Management Science*, 2002, no. 48(2), pp. 300–306.
9. Disney S. M., Towill D. R. The Effect of Vendor Managed Inventory (VMI) Dynamics on the Bullwhip Effect in Supply Chains. *International Journal of Production Economics*, 2003, no. 85, pp. 199–215.
10. Cardenas-Barron L. E., Trevino-Garza G., Wee H. M. A Simple and Better Algorithm to Solve the Vendor Managed Inventory Control System of Multi-Product Multi-Constraint Economic Order Quantity Model. *Journal Expert Systems with Applications*, 2012, no. 39(3), pp. 3888–3895.
11. Ryzhikov Iu. I. *Teoriia ocheredei i upravlenie zapasami* [The Theory of Queues and Inventory Control]. Saint-Petersburg, Piter Publ., 2001. 376 p. (In Russian).
12. Lukinskii V. V. *Aktual'nye problemy formirovaniia teorii upravleniia zapasami* [Actual Problems of Formation of the Theory of Inventory Management]. Saint-Petersburg, Sankt-Petersburgskii gosudarstvennyi inzhenerno-ekonomicheskii universitet Publ., 2008. 213 p. (In Russian).
13. Silver E. A., Pyke D. F., Peterson R. *Inventory Management and Production Planning and Scheduling*. New York, NY, USA, John Wiley and Sons, 1998. 737 p.
14. Tersine R. J. *Principles of Inventory and Materials Management*. Englewood Cliffs, NJ, USA, Prentice Hall PTR, 1994. 591 p.
15. Leyffer S. *PhD Thesis: Deterministic Methods for Mixed Integer Nonlinear Programming*. Dundee, USA, Department of Mathematics & Computer Science, University of Dundee, 1993. 117 p.
16. Alekseev A. O., Alekseev O. G., Anisimov V. G., Anisimov E. G., Iachkula N. I. Application of Markov Chains to the Evaluation of the Computational Complexity of the Simplex Method. *Izvestiia RAN. Teoriia i sistemy upravleniia*, 1988, no. 3, pp. 59–63 (In Russian).
17. Anisimov V. G., Anisimov E. G. A Method of Solving One Class of Integer Programming Problems. *Zhurnal vychislitel'noi matematiki i matematicheskoi fiziki* [Computational Mathematics and Mathematical Physics], 1989, vol. 29, no. 10, pp. 1586–1590 (In Russian).
18. Duran M., Grossmann I. An Outer-Approximation Algorithm for a Class of Mixed-Integer Nonlinear Programs. *Journal Mathematical Programming*, 1986, no. 36, pp. 307–339.
19. Geoffrion A. Generalized Benders Decomposition. *Journal Optimization Theory and Applications*, 1972, no. 10, pp. 237–260.
20. Benders J. Partitioning Procedures for Solving Mixed-Variables Programming Problems. *Computational Management Science*. 2005, vol. 2, iss. 1, pp. 3–19.
21. Westerlund T., Pettersson F. A Cutting Plane Method for Solving Convex MINLP Problems. *Journal Computers & Chemical Engineering*, 1995, no. 19, pp. 131–136.
22. Quesada I., Grossmann I. An LP/NLP Based Branch and Bound Algorithm for Convex MINLP Optimization Problems. *Journal Computers & Chemical Engineering*, 1992, no. 16, pp. 937–947.
23. Seyed Hamid Reza Pasandideh, Seyed Taghi Akhavan Nia-ki, Ali Roozbeh Nia. A Genetic Algorithm for Vendor Managed Inventory Control System of Multi-Product Multi-Constraint Economic Order Quantity Model. *Journal Expert Systems with Applications*, 2011, no. 3, pp. 2008–2716.
24. Gasratov M. G., Zakharov V. V. Game Theory Approach for Supply Chains Optimization in Case of Deterministic Demand. *Matematicheskaiia teoriia igr i ee prilozheniia*, 2011, no. 1, pp. 23–59 (In Russian).
25. Kuhn H. W., Tucker A. W. Nonlinear Programming. *Proc. of 2nd Berkeley Symp.* Berkeley, USA, University of California Press, 1951, pp. 481–492.

АЛЕКСЕЕВ
Владимир
Васильевич



Профессор, заведующий кафедрой информационно-измерительных систем и технологий Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ», почетный работник высшего профессионального образования РФ.

В 1973 году окончил Ленинградский электротехнический институт по специальности «Электронные вычислительные машины». В 1993 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором более 300 научных публикаций и шести патентов на изобретения. Область научных интересов — информационно-измерительные и управляющие системы мониторинга состояния технических и природных объектов и др.
Эл. адрес: vvalekseev@mail.eltech.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 90 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

БУТУСОВ
Денис
Николаевич



Доцент кафедры систем автоматизированного проектирования Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ», руководитель УНЦ «Центр технологий NationalInstruments».

В 2009 году окончил Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» по специальности «Системы автоматизированного проектирования». В 2012 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 30 научных публикаций. Область научных интересов — теория динамических систем, вычислительная математика, нелинейная динамика, параллельные вычисления, аппаратно-ориентированные численные методы.
Эл. адрес: butusovdn@mail.ru

АШУРКОВ
Иван
Сергеевич



Адъюнкт Ярославского высшего военного училища противовоздушной обороны.

В 2008 году окончил Ярославское высшее зенитное ракетное училище ПВО (ВИ) по специальности «Радиотехнические системы». Является автором пяти научных публикаций, шести свидетельств на регистрацию программ для ЭВМ и одного патента на полезную модель. Область научных интересов — многопозиционные радиолокационные системы.
Эл. адрес: ivan_ashurkov@mail.ru

БУРАКОВ
Михаил
Владимирович



Доцент кафедры управления и информатики в технических системах Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

В 1984 году окончил Ленинградский институт авиационного приборостроения по специальности «Автоматизированные системы управления». В 1994 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 150 научных публикаций. Область научных интересов — системы интеллектуального управления, нечеткие регуляторы, нейронные сети, эволюционные алгоритмы.
Эл. адрес: bmvm@sknt.ru

ЖИЛЬНИКОВА
Наталья
Александровна



Доцент кафедры инноватики и интегрированных систем качества Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

В 1992 году окончила Ленинградский технологический институт целлюлозно-бумажной промышленности по специальности «Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов», в 2006 — Санкт-Петербургский государственный политехнический университет по специальности «Маркетинг». В 2012 году защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 53 научных публикаций. Область научных интересов — эколого-технологическое нормирование и др.
Эл. адрес: nataliazhilnikova@gmail.com

ЗАХАРОВ
Виктор
Васильевич



Профессор, заведующий кафедрой математического моделирования энергетических систем Санкт-Петербургского государственного университета.

В 1975 году окончил Ленинградский государственный университет по специальности «Дискретная математика и математическая кибернетика».

В 1998 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора физико-математических наук.

Является автором более 100 научных публикаций.

Область научных интересов — оптимальное управление, теория игр и приложения, исследование операций.

Эл. адрес: mcvictor@mail.ru

ИВАНОВ
Юрий
Павлович



Доцент кафедры аэрокосмических измерительно-вычислительных комплексов Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

В 1959 году окончил Ленинградский электротехнический институт им. В. И. Ульянова (Ленина) по специальности «Радиотехника».

В 1970 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Является автором 80 научных публикаций, пяти авторских свидетельств на изобретения и на регистрацию программ для ЭВМ.

Область научных интересов — спектрально-марковская методология обработки сигналов, системы контроля приборных комплексов, синтез информационно-измерительных систем в условиях априорной неопределенности.

Эл. адрес: upi@mail.ru

КАКАЕВ
Виталий
Викторович



Доцент, начальник отдела, заместитель начальника управления Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург.

В 2000 году окончил Пушкинское высшее училище радиоэлектроники ПВО им. Е. Я. Савицкого по специальности «Электроснабжение».

В 2009 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 59 научных публикаций.

Область научных интересов — управление ресурсами информационных радиолокационных и оптико-электронных систем.

Эл. адрес: kakaev_vv@mail.ru

КАПЛИН
Александр
Юрьевич



Заместитель генерального директора, генеральный конструктор ОАО «Радиоавионика», Санкт-Петербург.

В 1985 году окончил Ленинградский механический институт по специальности «Радиоэлектронные устройства».

В 1997 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Является автором 50 научных публикаций, двух авторских свидетельств, двух патентов на изобретение и одного патента на полезную модель.

Область научных интересов — системы управления и связи специального назначения, человеко-машинные системы, бортовая радиолокация и радионавигация.

Эл. адрес: a.kaplin@list.ru

КАРИМОВ
Артур
Искандарович



Аспирант кафедры систем автоматизированного проектирования Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ».

В 2014 году окончил Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» по специальности «Информатика и вычислительная техника».

Является автором 16 научных публикаций.

Область научных интересов — теория управления, системы автоматизированного проектирования, вычислительная математика.

Эл. адрес: art.krmv@gmail.com

КАРИМОВ
Тимур
Искандарович



Аспирант кафедры систем автоматизированного проектирования Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ».

В 2014 году окончил Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» по специальности «Информатика и вычислительная техника».

Является автором 15 научных публикаций.

Область научных интересов — теория управления, системы автоматизированного проектирования, вычислительная математика.

Эл. адрес: carimus@gmail.com

**КОЗИОНОВ
Алексей
Петрович**



Инженер исследования и разработки отдела корпоративных технологий ООО «Сименс», группы бизнес-аналитики и мониторинга состояний, Санкт-Петербург, аспирант кафедры аэрокосмических измерительно-вычислительных комплексов Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. В 2012 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения по специальности «Приборостроение». Является автором 20 научных публикаций и трех патентов на изобретения. Область научных интересов — машинное обучение, искусственный интеллект, обработка сигналов. Эл. адрес: alexey.kozionov@siemens.com

**КОНОВАЛОВ
Александр
Сергеевич**



Профессор кафедры управления и информатики в технических системах Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, почетный работник высшего профессионального образования РФ. В 1968 году окончил Ленинградский институт авиационного приборостроения по специальности «Электрооборудование летательных аппаратов». В 1998 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором более 120 научных публикаций. Область научных интересов — автоматическое и интеллектуальное управление. Эл. адрес: Kononov@с4t.com

**КОСТИШИН
Максим
Олегович**



Аспирант, ассистент кафедры машинного проектирования бортовой электронно-вычислительной аппаратуры Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики, инженер АО «Санкт-Петербургское ОКБ «Электроавтоматика» им. П. А. Ефимова». В 2012 году окончил Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики по специальности «Управление и информатика в технических системах». Является автором 12 научных публикаций. Область научных интересов — геоинформационные системы, системы индикации авионики. Эл. адрес: maksim@kostishin.com

**ЛАХИН
Олег
Иванович**



Руководитель направления ООО «НПК «Разумные решения», Самара. В 1998 году окончил Поволжский институт информатики, радиотехники и связи по специальности «Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем», в 2006 году — Самарский государственный экономический университет по Федеральной программе подготовки управленческих кадров. Является автором 31 научной публикации. Область научных интересов — мультиагентные технологии для создания интеллектуальных систем управления ресурсами в реальном времени, использующих принципы самоорганизации и эволюции. Эл. адрес: lakhin@yandex.ru

**ЛЕШКО
Николай
Александрович**



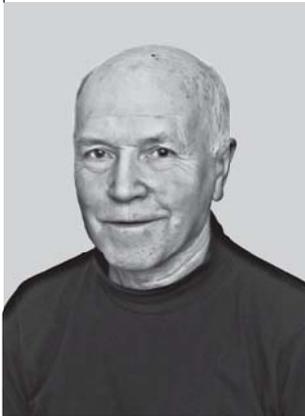
Доцент, докторант Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург. В 1991 году окончил Ярославское высшее зенитное ракетное командное училище ПВО по специальности «Инженер по эксплуатации радиоэлектронных систем». В 2003 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 61 научной публикации и одного патента на изобретение. Область научных интересов — многопозиционные радиолокационные системы. Эл. адрес: Nikolai_ZRU@mail.r

**МАРКЕЛОВ
Владимир
Владимирович**



Ведущий инженер-программист АО «Санкт-Петербургское ОКБ «Электроавтоматика». В 1996 году окончил Балтийский государственный технический университет им. Д. Ф. Устинова по специальности «Космические аппараты и разгонные блоки». Область научных интересов — бортовые комплексы летательных аппаратов, навигация и управление движением летательных аппаратов, алгоритмическое обеспечение бортовых вычислительных систем. Эл. адрес: vvmarkel@gmail.com

МИХАЙЛОВ
Владимир
Валентинович



Профессор кафедры вычислительных систем и сетей Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, ведущий научный сотрудник Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН.

В 1957 году окончил Ленинградский электротехнический институт по специальности «Математические и счетно-решающие приборы и устройства».

В 1999 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.

Является автором более 190 научных публикаций.

Область научных интересов — компьютерное моделирование в области экологии и робототехники, разработка систем автоматизации моделирования.

Эл. адрес: mwwcari@gmail.com

МКРТЫЧЯН
Александр
Рачикович



Генеральный директор, главный конструктор АО «НИИ командных приборов», Санкт-Петербург.

В 1982 году окончил Ленинградский институт авиационного приборостроения по специальности «Авиационное приборостроение».

Является автором 25 научных публикаций.

Область научных интересов — системы управления космическими аппаратами.

Эл. адрес: info@niikp.spb.ru

МОХОВ
Илья
Игоревич



Эксперт-исследователь отдела корпоративных технологий ООО «Сименс», группы бизнес-аналитики и мониторинга состояний, Санкт-Петербург.

В 2005 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет по специальности «Прикладная математика и физика», в 2006 — Университет Йюэнсуу по специальности «Вычислительные науки», Йюэнсуу, Финляндия.

Является автором 22 научных публикаций.

Область научных интересов — машинное обучение, искусственный интеллект, обработка сигналов.

Эл. адрес: ilya.mokhov@siemens.com

ОСТРОУМОВ
Олег
Александрович



Адъюнкт кафедры общепрофессиональных дисциплин Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного, Санкт-Петербург.

В 2009 году окончил Ставропольский военный институт связи РВ по специальности «Радиосвязь, радиовещание и телевидение».

Является автором трех научных публикаций.

Область научных интересов — математическое моделирование каналов связи, помехоустойчивость сигналов, многомерные сигнальные конструкции, разнесенный прием.

Эл. адрес: oleg-26@mail.ru

ПОПОВ
Валерий
Павлович



Доцент кафедры вычислительных систем и сетей Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

В 1971 году окончил Ленинградский институт авиационного приборостроения по специальности «Радиоэлектронные устройства».

В 1982 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Является автором 45 научных публикаций.

Область научных интересов — системы искусственного интеллекта.

Эл. адрес: valery-popov2009@yandex.ru

ПРОКОФЬЕВА
Анна
Леонидовна



Старший преподаватель кафедры иностранных языков Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург.

В 2005 году окончила Санкт-Петербургский университет по специальности «Филология».

Является автором 15 научных публикаций.

Область научных интересов — учебно-методическое обеспечение образовательного процесса на основе современных информационных технологий.

Эл. адрес: a_prokofieva@mail.ru

ПЯЙТ
Александр
Леонидович



Ведущий инженер исследования и разработки отдела корпоративных технологий ООО «Сименс», группы бизнес-аналитики и мониторинга состояний, Санкт-Петербург, аспирант кафедры вычислительных наук Университета Амстердама, Нидерланды. Награжден медалью и дипломом Министерства образования Российской Федерации. В 2014 году защитил докторскую диссертацию (PhD, Computational Science) в Университете Амстердама, Нидерланды. Является автором 22 научных публикаций. Область научных интересов — машинное обучение, искусственный интеллект, обработка сигналов. Эл. адрес: alexander.pyayt@siemens.com

САВИЩЕНКО
Николай
Васильевич



Профессор, заместитель начальника кафедры Военной академии связи. В 1986 году окончил Новосибирский государственный университет по специальности «Математика, прикладная математика», в 1989 году — Военную академию связи по специальности «Математическое обеспечение исследований вооружений и военной техники». В 2006 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором 121 научной публикации. Область научных интересов — математическое моделирование каналов связи, помехоустойчивость сигналов, многомерные сигнальные конструкции. Эл. адрес: snikaspb@mail.ru

СЕРГЕЕВ
Михаил
Борисович



Профессор, заведующий кафедрой вычислительных систем и сетей Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, директор НИИ информационно-управляющих систем Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики. В 1980 году окончил «ЛЭТИ». В 2001 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором более 100 научных публикаций и 14 патентов на изобретения. Область научных интересов — теория разрядных вычислений, методы проектирования спец-процессоров для систем контроля и управления и др. Эл. адрес: mbse@mail.ru

СОЛОВЬЕВА
Татьяна
Николаевна



Доцент кафедры вычислительных систем и сетей Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. В 2010 году окончила Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения по специальности «Информатика и вычислительная техника». В 2013 году защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 23 научных публикаций. Область научных интересов — техническая диагностика, теория динамических систем, теория автоматического управления, компьютерное моделирование. Эл. адрес: al2tn@yandex.ru

СОЛЬНИЦЕВ
Ремир
Иосифович



Профессор кафедры компьютерного проектирования информационно-измерительных систем Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. В 1956 году окончил Ленинградский электротехнический институт им. В. И. Ульянова (Ленина) по специальности «Гироскопические приборы и системы стабилизации». В 1970 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором 300 научных публикаций. Область научных интересов — системы автоматизации проектирования, системы управления, экологические системы. Эл. адрес: remira70@mail.ru

СТЕПАНОВ
Михаил
Георгиевич



Профессор, заместитель генерального конструктора по научной работе ОАО «Радиоавионика», Санкт-Петербург. В 1971 году окончил Ленинградскую военную инженерную Краснознаменную академию им. А. Ф. Можайского по специальности «Радиотехнические системы». В 1995 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором 150 научных публикаций, 11 авторских свидетельств и одного патента на изобретение. Область научных интересов — теория статистического оценивания и обработки информации, космическая радионавигация и радиолокация, системы управления и связи специального назначения. Эл. адрес: smg099@mail.ru

ТКАЧЕВА
Анастасия
Александровна



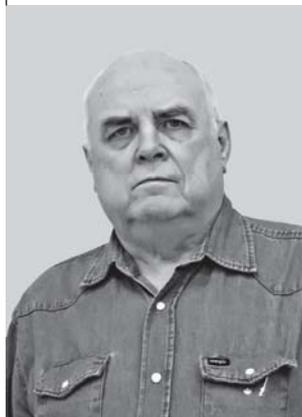
Аспирант Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М. Ф. Решетнёва, Красноярск.

В 2003 году окончила магистратуру Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М. Ф. Решетнёва по специальности «Информатика и вычислительная техника».

Область научных интересов — трехмерное моделирование, обработка аэрофотоснимков, классификация данных лазерного сканирования ландшафтных сцен.

Эл. адрес:
tkacheva.ivt@gmail.com

ТОРГАШЕВ
Валерий
Антонович



Профессор, главный научный сотрудник Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН.

В 1961 году окончил Ленинградский электротехнический институт им. В. И. Ульянова (Ленина) по специальности «Автоматика и телемеханика».

В 1987 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.

Является автором более 150 научных публикаций и 42 авторских свидетельств на изобретения.

Область научных интересов — теория автоматов, динамические автоматные сети, параллельные вычисления, суперкомпьютеры с динамической архитектурой.
Эл. адрес: tor@spiiras.nw.ru

ФАВОРСКАЯ
Маргарита
Николаевна



Профессор, заведующая кафедрой информатики и вычислительной техники Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М. Ф. Решетнёва, Красноярск.

Почетный работник высшего профессионального образования РФ. В 1980 году окончила Рыбинский авиационный технологический институт по специальности «Конструирование и производство электронно-вычислительной аппаратуры».

В 2011 году защитила диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором около 160 научных публикаций.

Область научных интересов — распознавание образов, цифровая обработка изображений, кластерный анализ, интеллектуальные технологии обработки данных.
Эл. адрес: favorskaya@sibsau.ru

ЦАРЕВ
Игорь
Владимирович



Ведущий программист Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН.

В 1970 году окончил Ленинградский электротехнический институт им. В. И. Ульянова (Ленина) по специальности «Электронные вычислительные машины».

Является автором более 40 научных публикаций.

Область научных интересов — системное программирование, языки программирования, трансляторы, параллельное программирование, операционные системы.
Эл. адрес: civ@iias.spb.su

ЧУГУНОВ
Евгений
Сергеевич



Аспирант кафедры математического моделирования энергетических систем факультета прикладной математики — процессов управления Санкт-Петербургского государственного университета.

В 2013 году окончил магистратуру факультета прикладной математики — процессов управления Санкт-Петербургского государственного университета по специальности «Прикладная математика и информатика».

Является автором трех научных публикаций.

Область научных интересов — оптимальное управление, исследование операций.
Эл. адрес: mail@evgenius.org

ШИШКИН
Илья
Александрович



Начальник экологического компьютерного центра Санкт-Петербургского государственного технологического университета растительных полимеров.

В 2001 году окончил инженерно-кибернетический факультет Санкт-Петербургского государственного технологического института по специальности «Автоматизация технологических процессов и производств».

В 2014 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 40 научных публикаций и двух патентов на изобретения.

Область научных интересов — геоинформационные системы в области оценки состояния инженерных сооружений защиты территории от подтопления.
Эл. адрес: ilya@mail.ru

ШУКАЛОВ
Анатолий
Владимирович



Генеральный директор АО «Санкт-Петербургское ОКБ «Электроавтоматика» им. П. А. Ефимова». В 2014 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 30 научных и учебно-методических публикаций. Область научных интересов — проектирование бортовой оптико-электронной и аналого-цифровой вычислительной техники, интегрированная модульная авионика, системы бортовой индикации.
Эл. адрес: aviation78@mail.ru

ЯКИМОВСКИЙ
Дмитрий
Олегович



Начальник отделения, главный конструктор по направлению АО «НИИ командных приборов», Санкт-Петербург. В 1987 году окончил Ленинградский институт авиационного приборостроения по специальности «Электрические машины». В 2009 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 17 научных публикаций. Область научных интересов — системы управления космическими аппаратами, мехатроника.
Эл. адрес: info@niikp.spb.ru

ЯКОВЕЦ
Ольга
Борисовна



Аспирант кафедры управления в технических системах Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, ведущий инженер АО «НИИ командных приборов». В 2007 году окончила Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения по специальности «Информатика и управление в технических системах». Область научных интересов — нечеткое управление, нейронные сети.
Эл. адрес: myachik@yandex.ru

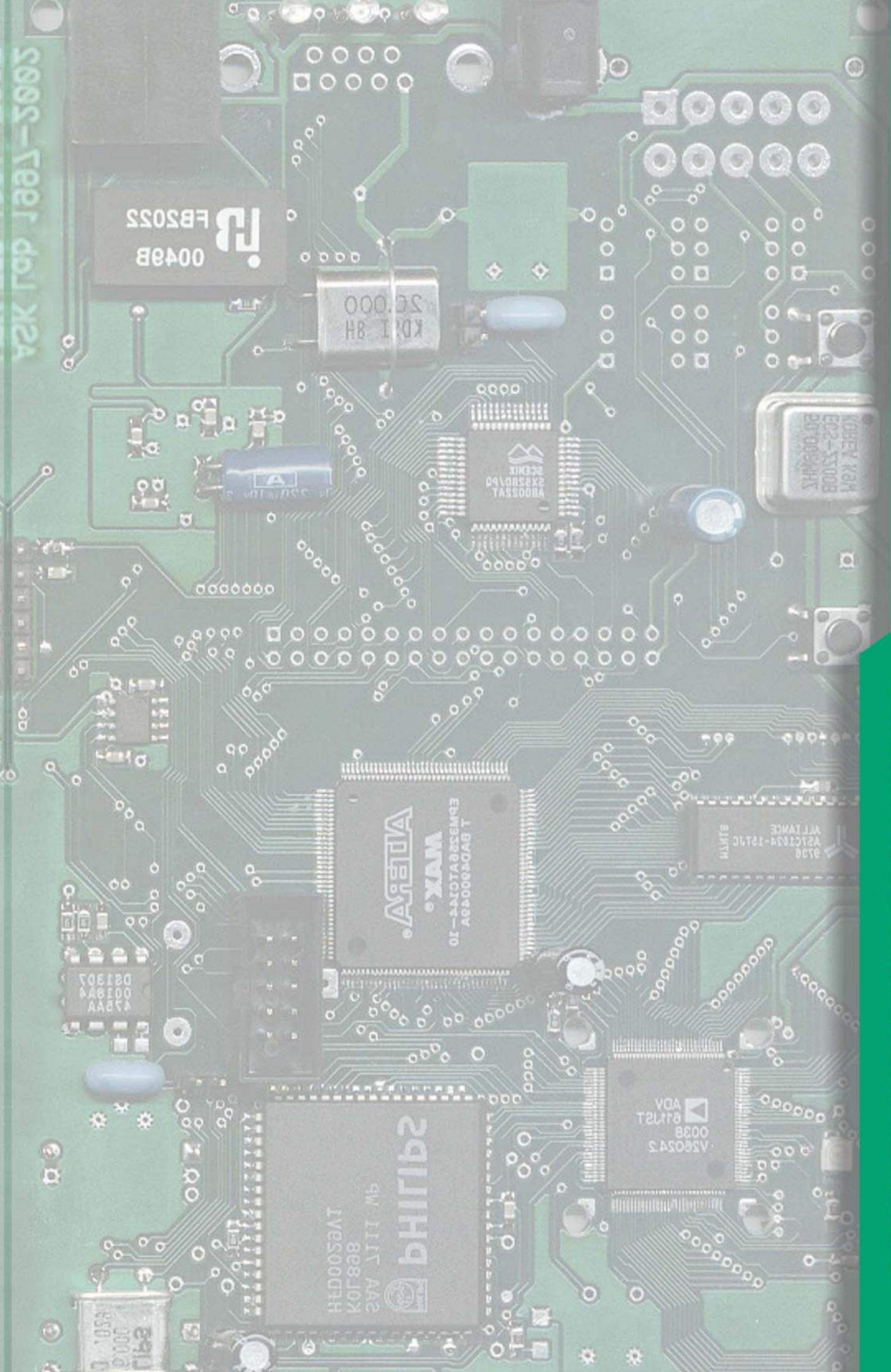
СОДЕРЖАНИЕ ЖУРНАЛА «ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ» ЗА 2015 г. [№ 1–6]

	№	Стр.
Balotin N. A., Sergeev M. B. Regular Hadamard Matrix of Order 196 and Similar Matrices	1	2
Balotin N. A., Djokovic D. Z. Negaperiodic Golay Pairs and Hadamard Matrices	5	2
Balotin N. A., Seberry J., Sergeev M. B. Three-Level Cretan Matrices of Order 37	2	2
Balotin N. A., Sergeev M. B., Hadar O., Seberry J. Three-Level Cretan Matrices Constructed via Conference Matrices	2	4
Ben-Shimol Y., Blaunstein N., Sergeev M. B. Depolarization Effects of Radio Wave Propagation in Various Land Built-Up Environments	1	68
Ben-Shimol Y., Kitroser I. An Efficient Cross-Layer Aware Mapping of VoIP Calls in Wireless OFDMA Systems. Part I. Problem description and channel tracking	2	90
Ben-Shimol Y., Kitroser I. An Efficient Cross-Layer Aware Mapping of VoIP Calls in Wireless OFDMA Systems. Part II: Mapping Algorithms and their Performance	3	77
Simana E., Simian R., Portnoy S., Jaffe A., Dekel B. Z. Feasibility Study — Vitamin D Loading Determination by Ftir-Atr	3	107
Абрамов А. П., Петров П. Н. Устройство определения фазовой структуры радиосигнала	4	87
Ардашов А. А., Арсеньев В. Н., Силантьев С. Б. Метод обработки неоднородной статистической информации о характеристиках точности системы управления	5	55
Арсеньев В. Н., Трофимов И. А. Решение задачи выбора в условиях физической неоднородности и ограниченности наблюдаемых признаков	4	114
Ашурков И. С., Какаев В. В., Лешко Н. А. Оптимизация пространственной структуры многопозиционной радиолокационной системы	6	81
Бакин Е. А., Апанасенко Н. В. Анализ устойчивости системы с позиционно-импульсной модуляцией к воздействию ХИП при высоких отношениях сигнал/шум	4	100
Балашова Е. С. Современные модели ресурсного менеджмента промышленного предприятия	1	105
Балонин Н. А. Дискретные частотные характеристики элементарных динамических звеньев	4	17
Балонин Н. А., Джокович Д. Ж. Симметрия двучиклических матриц Адамара и периодические пары Голея	3	2
Балонин Н. А., Сергеев М. Б. О значении матриц начального приближения в алгоритме поиска обобщенных взвешенных матриц глобального и локального максимума детерминанта	6	2
Барковский Е. А., Соколов А. В. Оптимальное управление двумя параллельными FIFO-очередями на бесконечном времени	5	65
Басов О. О., Карпов А. А. Анализ стратегий и методов объединения многомодальной информации	2	7
Бендерская Е. Н., Никитин К. В. Возможности использования импульсных рекуррентных нейронных сетей для анализа электрокардиограмм	1	85
Браницкий А. А., Котенко И. В. Обнаружение сетевых атак на основе комплексирования нейронных, иммунных и нейронечетких классификаторов	4	69
Бритов Г. С. Метод тестового диагностирования линейных динамических систем	1	77
Бураков М. В., Коновалов А. С., Яковец О. Б. Эволюционный синтез нечетких регуляторов	6	28
Бурлуцкий С. Г., Езерский В. В., Хахаев И. А. Электронный паспорт как основа информационного обеспечения автоматизированных систем поддержки принятия решений	1	100
Васильев Н. Н., Дужин В. С. Построение неприводимых представлений симметрической группы $S(n)$ с большими и максимальными размерностями	3	17
Волхонский В. В., Малышкин С. Л. Методика анализа эффективности обнаружения нарушителя средствами систем физической защиты	3	70
Востриков А. А., Сергеев М. Б., Литвинов М. Ю. Маскирование цифровой визуальной информации: термин и основные определения	5	116
Горбунов Ю. Н. Принцип стохастического обеления пассивных коррелированных помех в задаче оптимизации систем селекции движущихся целей	2	15

	№	Стр.
Городецкий А. Е., Тарасова И. Л., Зиняков В. Ю. Комбинированное логико-вероятностное и лингвистическое моделирование отказов сложных систем	1	35
Городецкий А. Е., Тарасова И. Л., Курбанов В. Г., Агапов В. А. Математическая модель системы автоматического управления модуля SEMS	3	40
Гранкин М. А. Модель для оценки среднего количества активных абонентов в системе межмашинного взаимодействия в сетях 5-го поколения	5	72
Григорьева К. В. Парето-оптимальность в статической конкурентной модели принятия решений	5	124
Грудяева Е. К. Синтез системы управления технологическим процессом удаления соединений азота из сточных вод	4	59
Грызунов В. В. Метод динамического формирования пулов в информационно-вычислительных системах военного назначения	1	13
Гуревич В. Э., Егоров С. Г. Исследование нелинейных искажений радио-сигнала в системе CDMA с квадратурно-амплитудной модуляцией	5	106
Дурнев Р. А., Котосорова А. С., Галиуллина Р. Л. Системно-динамическая модель информирования населения при аварии на химически опасном объекте	2	67
Душин С. Е., Абрамкин С. Е. Математическое моделирование управляемых технологических процессов осушки природного газа	4	41
Емельянов В. Ю., Докучаева А. Н. Исследование методов поиска приближенного решения в задаче сокращения трудоемкости статистического моделирования	1	43
Еремин С. В. Об алгоритме принятия решений: от архитектуры региональной авиасети к опциональности самолетов (на примере Красноярского края)	3	117
Жаринов И. О., Жаринов О. О. Модель системы автоматического управления тепловым режимом жидкокристаллической панели бортового средства индикации	4	26
Жаринов И. О., Жаринов О. О. Оценка параметров математической модели цветопередачи жидкокристаллической панели	2	49
Жильникова Н. А., Алексеев В. В., Шишкин И. А. Информационно-измерительная система мониторинга защиты территории топливно-энергетического комплекса от подтопления на основе геоинформационной технологии	6	93
Зиятдинов С. И. Синтез дифференцирующего фильтра с линейной частотной характеристикой	4	119
К 100-летию со дня рождения Виктора Антоновича Бесекерского	4	122
Калюжный В. П. Проблема устойчивости цифровых регуляторов с сетевым способом доставки управляющих величин	4	92
Каплин А. Ю., Степанов М. Г. Использование автономной навигационной системы высокоточного позиционирования пешехода на местности	6	86
Киселев В. Ю., Монаков А. А. Предсказание траектории воздушного судна в автоматизированных системах управления воздушным движением	4	33
Козинов И. А. Обнаружение локальных свойств анализируемых сигналов и процессов с использованием вейвлет-преобразования	1	21
Козионов А. П., Пяйт А. Л., Мохов И. И., Иванов Ю. П. Алгоритм на основе модели передаточной функции и одноклассовой классификации для обнаружения аномального состояния дамб	6	10
Космынина Н. А., Легалов А. И., Барков А. В., Лапин А. А. Разработка языка управления космическими аппаратами	5	82
Костоглотов А. А., Кузнецов А. А., Лазаренко С. В., Лосев В. А. Синтез фильтра сопровождения со структурной адаптацией на основе объединенного принципа максимума	4	2
Котенко И. В., Дойникова Е. В. Методика выбора контрмер в системах управления информацией и событиями безопасности	3	60
Котликов Е. Н., Новикова Ю. А., Коваленко И. И. Программа синтеза и анализа интерференционных покрытий Film Manager	3	51
Красильников Н. Н., Красильникова О. И. Методы конвертации 2D-изображений и видео в стереоскопический формат	5	18
Крепкий И. А. Зависимость между песочной группой графа и его матроидом	3	23
Кузнецов В. А. Сегментация исходных снимков для фотометрического метода трехмерного сканирования	3	29
Кульминский Д. Д., Пономаренко В. И., Караваев А. С., Прохоров М. Д. Система связи, основанная на синхронизации систем с задержкой с переключением хаотических режимов	3	85

	№	Стр.
Лахин О. И. Анализ событий адаптивного планирования грузопотока российского сегмента международной космической станции	6	19
Лахин О. И., Полников А. С., Симонова Е. В., Скобелев П. О. Теория сложности и проблема управления жизненным циклом изделий аэрокосмической промышленности	1	4
Лахин О. И., Симонова Е. В., Скобелев П. О. Подход к разработке прототипа интеллектуальной системы поддержки принятия согласованных решений при проектировании малоразмерных космических аппаратов на основе мультиагентных технологий	2	43
Лахин О. И., Симонова Е. В., Скобелев П. О., Полников А. С., Юрыгина Ю. С. Подход к разработке прототипа интеллектуальной системы поддержки процессов технического обслуживания и ремонта при эксплуатации изделий аэрокосмической промышленности на основе мультиагентных технологий	4	10
Лукин В. Н., Яценко В. В. Параметрический бутстреп-метод вычисления контрольных пределов карт для асимметрично распределенных данных	2	98
Лямин А. В., Череповская Е. Н. Экспериментальные исследования биометрической идентификации пользователей на основе данных айтрекера Tobii X2-30	5	26
Маличенко Д. А. Эвристический алгоритм расчета размеров памяти в многоуровневой системе хранения	5	100
Мальцев Г. Н. Помехоустойчивость и скрытность передачи информации по радиоканалам на основе комбинированного случайного кодирования	2	82
Мальцев Г. Н., Панкратов А. Н., Лесняк Д. А. Исследование вероятностных характеристик изменения защищенности информационной системы от несанкционированного доступа нарушителей	1	50
Мальцев Г. Н., Сакулин А. Н. Статистические характеристики ускоренного поиска сигналов по задержке с использованием псевдослучайных последовательностей с локально оптимальными корреляционными свойствами	4	78
Маркелов В. В., Костишин М. О., Шукалов А. В. Коррекция курса инерциальной навигационной системы до взлета самолета по информации от спутниковой навигационной системы	6	34
Мельников Ю. П. Особенности методики оценки эффективности применения переотраженных сигналов «посторонней» РЛС для скрытного определения координат кораблей и летательных аппаратов	4	108
Михайлов В. В., Соловьева Т. Н., Попов В. П. Моделирование кинематики шагающего робота	6	50
Муромцев Д. Ю., Грибков А. Н., Куркин И. А. База знаний интеллектуальной информационно-управляющей системы многомерным объектом	5	60
Назаров А. В., Якимов В. Л., Авдеев В. А. Алгоритм максимизации энтропии обучающей выборки и его использование при синтезе моделей прогноза дискретных состояний нелинейных динамических систем	2	57
Пешкова Г. Ю. Концептуальные подходы к формированию стратегии развития горнопромышленного комплекса местного значения	3	112
Пономарев А. В. Архитектура децентрализованной рекомендующей системы, основанной на применении локально-чувствительного хеширования	5	91
Прокофьева А. Л. Применение электронных учебных курсов в процессе изучения иностранного языка в высшем учебном заведении	6	98
Савищенко Н. В., Остроумов О. А. Расчет оптимального и рационального числа ветвей разнесения в каналах связи с аддитивным белым гауссовым шумом и общими замираниями Райса — Накагами	6	71
Скаков Е. С., Малыш В. Н. Использование алгоритмов мултистарта и поиска с запретами для решения задачи размещения базовых станций	3	99
Солёный С. В., Солёная О. Я., Ковалёв А. П., Демченко Г. В. Формирование алгоритмов функционирования автоматической системы мониторинга и диагностики электропроводок	2	30
Сольнищев Р. И., Каримов А. И., Каримов Т. И., Бутусов Д. Н., Мкртычян А. Р., Якимовский Д. О. Автоматизированное рабочее место проектировщика цифровых регуляторов командных приборов	6	66
Сольнищев Р. И., Коршунов Г. И., Баранова О. В. Замкнутая система управления нейтрализацией отработавших газов автомобилей	2	37
Степанов А. Г., Семин С. Г. Имитационная модель инвестиционного проекта технического перевооружения производственной линии	1	92

	№	Стр.
Тарасов С. В., Бураков В. В. Контекстно зависимый способ поиска нечётких дубликатов в реляционных базах данных	2	76
Татарникова Т. М. Структурный синтез центра сопряжения корпоративных сетей	3	92
Ткачева А. А., Фаворская М. Н. Моделирование трехмерных сцен лесных участков по данным лазерного сканирования и аэрофотоснимкам	6	40
Торгашев В. А., Царев И. В. Технологии решения сложных задач на основе динамических автоматных сетей	6	57
Фридман А. Я. Управление комбинированным выводом в дискретных интеллектуальных системах	3	35
Фридман А. Я., Кулик Б. А., Курбанов В. Г. Метод управления прямым логическим выводом в интеллектуальных системах с дискретными доменами переменных	1	29
Хименко В. И. Лазерные информационные системы: принципы построения статистической теории	5	43
Хомоненко А. Д., Данилов А. И., Данилов А. А. Нестационарные модели стратегий испытаний программных средств при вероятностных параметрах обнаружения ошибок	4	50
Цыбульник А. Н., Лешко Н. А. Адаптивный прием частотно-модулированных сигналов с неизвестным законом модуляции	3	46
Чепруков Ю. В. Синтез бинарных R-кодов	1	59
Чугунов Е. С., Захаров В. В. Эвристический метод решения многопродуктовой задачи управления запасами	6	105
Юлин С. С., Паламарь И. Н. Метод классификации сигналов на основе спектрального анализа графа кластерного разбиения	2	23
Ястребов В. А., Веселов А. И., Гильмутдинов М. Р. Базовые методы и принципы построения алгоритмов восстановления регионов изображений	5	34
Сведения об авторах	1	112
Сведения об авторах	2	107
Сведения об авторах	3	121
Сведения об авторах	4	125
Сведения об авторах	5	130
Сведения об авторах	6	112



ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

ISSN 1684-8853



10-12 августа, 2016 Казань



8-я международная специализированная выставка

А ВИА **К** ОСМИЧЕСКИЕ **Т** ЕХНОЛОГИИ, СОВРЕМЕННЫЕ МАТЕРИАЛЫ И **О** БОРУДОВАНИЕ

ОРГАНИЗАТОРЫ:

Кабинет Министров Республики Татарстан,
Министерство промышленности и торговли Республики Татарстан,
Мэрия города Казани,
Казанский национальный исследовательский
технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ,
ОАО «Казанская ярмарка»

12+



Россия, 420059, г. Казань, Оренбургский тракт, 8,
Выставочный центр "Казанская ярмарка"
Тел/факс: (843) 570-51-26, 570-51-11, 570-51-23
E-mail: d9@expokazan.ru, www.aktokazan.ru