

ИНФОРМАЦИОННО- УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

6(85)/2016

6(85)/2016

INFORMATSIONNO- UPRAVLIAIUSHCHIE SISTEMY (INFORMATION AND CONTROL SYSTEMS)

REFEREED EDITION

Founder
«Information and Control Systems», Ltd.

Publisher
Saint-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 Council
C. Christodoulou
PhD, Professor, Albuquerque, New Mexico, USA
L. Chubraeva
RAS Corr. Member, Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia
L. Fortuna
PhD, Professor, Catania, Italy

A. Fradkov
Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia
V. Kozlov
Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

B. Meyer
Dr. Sc., Professor, Zurich, Switzerland
A. Ovodenko
Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

Y. Podoplyokin
Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia
Yu. Shokin
RAS Academician, Dr. Sc., Phys.-Math., Novosibirsk, Russia
V. Simakov
Dr. Sc., Tech., Professor, Moscow, Russia

V. Vasilev
RAS Corr. Member, Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia
R. Yusupov
RAS Corr. Member, Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

Editorial Board
V. Anisimov
Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia
B. Bezruchko
Dr. Sc., Phys.-Math., Saratov, Russia
N. Blaunstein
Dr. Sc., Phys.-Math., Professor, Beer-Sheva, Israel

A. Dudin
Dr. Sc., Tech., Professor, Minsk, Belarus
I. Dumer
PhD., Professor, Riverside, USA
V. Khimenko
Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

G. Maltsev
Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia
G. Matvienko
Dr. Sc., Phys.-Math., Professor, Tomsk, Russia
V. Melekhin
Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

A. Shalyto
Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia
A. Shelupanov
Dr. Sc., Tech., Professor, Tomsk, Russia

A. Shepeta
Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia
A. Smirnov
Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia
Z. Yuldashev
Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

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

Editor: A. Larionova

Proofreader: T. Zvertanovskaia

Design: N. Karavaeva, M. Chernenko

Layout and composition: N. Karavaeva, J. Umnitsina

Contact information

The Editorial and Publishing Center, SUAI
67, B. Morskaia, 190000, St. Petersburg, Russia
Website: <http://i-us.ru/en>, E-mail: i-us.spb@gmail.com
Tel.: +7 - 812 494 70 02

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.

© Corporate authors, 2016

INFORMATION PROCESSING AND CONTROL

Vostrikov A. A., Kuchin N. V., Petrenko E. A., Sergeev A. M., Solov'yev N. V., Solov'eva T. N. *Improving the Legibility of Informative Fragments of Monochrome Infrared Images* 2

Kostoglotov A. A., Kuznetsov A. A., Lazarenko S. V., Derabkin I. V. *Structural Adaptation of Discrete Algorithms of Combined-Maximum Principle in Assessment of Movement Parameters* 10

INFORMATION AND CONTROL SYSTEMS

Shilov N. G. *Methodology of Developing Proactive Recommender Systems for Infomobile Applications* 16

SYSTEM AND PROCESS MODELING

Nenashev V. A., Blaunstein N. S. *Modeling Radio Wave Propagation in an Earth-Atmosphere Channel* 25

Shmelev V. V., Okhtilev M. Yu. *System of Rocket and Space Technology Functioning Model Quality Indicators* 34

Karpovich S. N. *Topic Model with an Infinite Vocabulary* 43

HARDWARE AND SOFTWARE RESOURCES

Novikov F. A., Afanasieva I. V. *Cooperative Interaction of Automata Objects* 50

Novozhilov D. A., Chechulin A. A., Kotenko I. V. *Improving Website Categorization Based on HTML Tag Statistics for Blocking Unwanted Content* 65

Torgashev V. A., Tsarev I. V. *Modern Circuitry Implementation of Dynamic Architecture Supercomputers* 74

INFORMATION SECURITY

Popova E. V. *Choosing an Information Protection System Taking into Account the Company Competitiveness* 85

INFORMATION CODING AND TRANSMISSION

Ulianov G. N., Cherenok N. G., Ignatiev I. O. *Information Exchange between Navigation Posts and a Navigation Object in an Active-Passive System* 91

CONTROL IN SOCIAL AND ECONOMIC SYSTEMS

Popukaylo V. S. *Linear Correlation Communication in Multidimensional Method of Point Distributions* 96

BRIEF SCIENTIFIC REPORTS

Golubkov V. A., Shishlakov V. F., Sharafudinov T. T., Lukyanenko I. N. *Modeling Spectral Characteristics of Gear Engagement Stiffness* 99

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

103

Submitted for publication 07.11.16. Passed for printing 19.12.16. Format 60×84_{1/8}.
Offset paper. Phototype SchoolBookC. Digital printing.

Layout original is made at the Editorial and Publishing Center, SUAI,
67, B. Morskaia, 190000, St. Petersburg, Russia
Printed from slides at the Editorial and Publishing Center, SUAI,
67, B. Morskaia, 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(85)/2016

РЕЦЕНЗИРУЕМОЕ ИЗДАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

Учредитель
ООО «Информационно-управляющие системы»

Издатель
Санкт-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. Кристофолу,
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. Т. 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

Г. Г. Матвиенко,
д-р физ.-мат. наук, проф., Томск, 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. Хименко,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

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

А. А. Шелупанов,
д-р техн. наук, проф., Томск, 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, Ю. В. Умницына

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, 2016

ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И УПРАВЛЕНИЕ

Востриков А. А., Кучин Н. В., Петренко Е. А., Сергеев А. М., Соловьев Н. В., Соловьева Т. Н. Улучшение различимости информативных фрагментов монохромных ИК-изображений 2

Костоготов А. А., Кузнецов А. А., Лазаренко С. В., Дерябкин И. В. Метод структурной адаптации дискретных алгоритмов объединенного принципа максимума в задачах оценки параметров движения 10

ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

Шилов Н. Г. Методология построения проактивных рекомендуемых систем для инфомобильных приложений 16

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ

Ненашев В. А., Блаунштейн Н. Ш. Моделирование процесса распространения радиоволн в канале «земля-атмосфера» 25

Шмелев В. В., Охтилев М. Ю. Система показателей качества моделей технологических процессов функционирования ракетно-космической техники 34

Карпович С. Н. Тематическая модель с бесконечным словарем 43

ПРОГРАММНЫЕ И АППАРАТНЫЕ СРЕДСТВА

Новиков Ф. А., Афанасьева И. В. Кооперативное взаимодействие автоматных объектов 50

Новожилов Д. А., Чечулин А. А., Котенко И. В. Улучшение категорирования веб-сайтов для блокировки неприемлемого содержимого на основе анализа статистики HTML-тэгов 65

Торгашев В. А., Царев И. В. Реализация суперкомпьютеров с динамической архитектурой на современной элементной базе 74

ЗАЩИТА ИНФОРМАЦИИ

Попова Е. В. Метод выбора системы защиты информации с учетом критерия конкурентоспособности предприятия 85

КОДИРОВАНИЕ И ПЕРЕДАЧА ИНФОРМАЦИИ

Ульянов Г. Н., Черенок Н. Г., Игнатьев И. О. Организация информационного обмена навигационных постов и объекта навигации в активно-пассивной системе 91

УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Попукайло В. С. Исследование линейной корреляционной связи в многомерном методе точечных распределений 96

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Голубков В. А., Шишлаков В. Ф., Шарафудинов Т. Т., Лукьяненко И. Н. Моделирование спектральных характеристик жесткости зубчатого зацепления 99

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

103

Сдано в набор 07.11.16. Подписано в печать 19.12.16. Формат 60×84 1/8.

Бумага офсетная. Гарнитура SchoolBookC. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 13,02. Уч.-изд. л. 18,1. Тираж 1000 экз (1-й завод 150 экз). Заказ 484.

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.

УЛУЧШЕНИЕ РАЗЛИЧИМОСТИ ИНФОРМАТИВНЫХ ФРАГМЕНТОВ МОНОХРОМНЫХ ИК-ИЗОБРАЖЕНИЙ

А. А. Востриков^а, канд. техн. наук, доцент

Н. В. Кучин^а, канд. техн. наук, доцент

Е. А. Петренко^а, заведующая лабораторией

А. М. Сергеев^а, старший преподаватель

Н. В. Соловьев^а, канд. техн. наук, доцент

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

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

Цель: показать возможность улучшения различимости информативных фрагментов монохромных изображений в ИК-диапазоне. **Методы:** применяются методы увеличения контрастности и резкости изображений с учетом вариативности параметров и соответствующих затрат времени на обработку ИК-изображений различных размеров. **Результаты:** на основе проведенного анализа локальной контрастности ИК-изображений, алгоритмической сложности и возможности использования в автоматическом режиме различных методов повышения различимости фрагментов делаются выводы о необходимости использования для улучшения различимости, в первую очередь, подбора аппаратных средств, оптических систем и узкополосных ИК-фильтров, а в случае необходимости улучшения различимости программными средствами — применения методов повышения контрастности попиксельным преобразованием. **Практическая значимость:** для ИК-изображений, полученных в сложных условиях, улучшение различимости информативных фрагментов обеспечивается тонкими настройками регулируемых параметров используемых методов повышения контрастности, что демонстрируется результатами программного повышения различимости объектов на представленных примерах.

Ключевые слова — системы видеомониторинга, видеосистемы, аэрокосмические снимки, ИК-диапазон, монохромное изображение, фрагмент монохромного изображения, улучшение различимости.

Введение

В настоящее время все более широкое распространение в гибридных системах видеонаблюдения и контроля объектов, в системах аэрокосмического мониторинга и др. получают видеокамеры инфракрасного (ИК) диапазона.

Путем обоснованного выбора спектрального и интегрального коэффициентов пропускания объектива ИК-камеры, а также учета на этапе проектирования геометрооптических параметров, функции рассеяния и разрешения объектива можно повысить различимость объектов на ИК-снимках. Известные разработки классических и гибридных объективов [1, 2] с минимизированным числом оптических элементов, формирующих ИК-поток, позволяют не только улучшить контрастные характеристики, снизить световые потери и уменьшить искажения, но и сформировать заданный спектр пропускания [3].

Именно за счет правильного выбора спектра пропускания можно существенно увеличить различимость объектов на этапе получения ИК-снимков. Проблема в широком ИК-диапазоне заключается в близости температур объектов и фона, составляющих в большинстве случаев около 300 К, в сопоставимости их отражающих и поглощающих способностей, а также близости особенностей их спектров. Как известно [4], тепловой

контраст объекта и фона определяется отношением разности интегральных плотностей потоков излучения объекта и фона к их сумме. В свою очередь интегральная плотность потока излучения в спектральном диапазоне ИК-приемника зависит от температуры излучающего объекта, спектральных характеристик его материала, а также расстояния между объектом и ИК-камерой, их взаимной ориентации и полосы пропускания объектива.

Построение кривых изменения теплового контраста интересующих наблюдателя объектов на различном фоне и их последующий анализ позволяют выбрать полосу пропускания объектива, при которой достигается максимальный тепловой контраст [5]. Для слабоконтрастных объектов, имеющих спектральную кривую с несколькими пиками, возможно применение многополосных оптических систем фильтрации. Например, спектральный коэффициент излучения кожи человека имеет максимум на длине волны 3 мкм, провал — на длине 4 мкм и значение, близкое к максимуму, на интервале 6–14 мкм [4]. Узкополосные интерференционные фильтры, позволяющие ограничить спектр пропускания оптической системы ИК-камеры, достаточно известны и вполне доступны [6].

Следует отметить, что минимизация шумов электронного тракта ИК-камеры, учет требова-

ний к точности фокусировки объектива, разрешающей способности и частотно-контрастных характеристик растровой матрицы также позволяют существенно повысить различимость объектов на ИК-снимках [7–9].

Если использование перечисленных выше методов не привело к желаемой различимости малозаметных объектов на ИК-снимке, то в таком случае необходимо применять методы увеличения локальной контрастности и резкости, а также методы подавления шума на полученном ИК-изображении. Следует отметить, что современные видеокамеры снабжены достаточно эффективными средствами подавления шума на аппаратном уровне в автоматическом режиме, поэтому эти методы далее рассматриваться не будут. Методы повышения контрастности и резкости, как правило, применяются в интерактивном режиме, т. е. требуют от оператора программного обеспечения установки ряда параметров, существенно влияющих на результат обработки изображений.

В настоящей работе будут рассмотрены получаемые в среднем ИК-диапазоне (1,5–5,1 мкм) монохромные растровые изображения, на которых, в силу их специфики и действия внешних факторов, часто нельзя достаточно надежно и быстро распознавать интересующие наблюдателя объекты [10, 11]. На таких изображениях различие в яркости соседних фрагментов может составлять всего одно или два значения от полного диапазона 0...255, что не позволяет ни автоматически, ни полуавтоматически идентифицировать объект, особенно в режиме реального времени. Повысить различимость объектов на ИК-снимках можно как за счет подбора оптической системы и выбора диапазона фиксируемого ИК-излучения непосредственно в процессе получения ИК-изображения, так и за счет последующей цифровой обработки полученных ИК-снимков.

Основные понятия и определения

Под контрастностью изображения C понимают [12]

$$C = z_{\max} - z_{\min}, \quad (1)$$

где z_{\max} и z_{\min} — соответственно максимальная и минимальная яркость пикселей на изображении. Относительная контрастность $C_{\text{отн}} = \frac{C}{z_m}$, где $z_m = 255$ — максимально возможная яркость пикселя на изображении. Контрастность может быть оценена как для всего изображения (глобальная контрастность), так и для какой-то части изображения (локальная контрастность). В последнем случае z_{\max} и z_{\min} представляют собой яркости соседних фрагментов, контраст которых и оценивается.

Резкость изображения R является локальной характеристикой [12], так как

$$R = \frac{z_{\max} - z_{\min}}{l_{\max} - l_{\min}}, \quad (2)$$

где z_{\max} и z_{\min} — максимальная и минимальная яркость пикселей с координатами l_{\max} , l_{\min} соответственно, совпадающих с границей зоны изменения яркости между фрагментами, т. е. контурной линией. Можно сказать, что резкость определяется производной функции яркости, т. е. чем шире контурная линия между фрагментами, тем меньше резкость.

Из (1) и (2) следует, что увеличение контрастности всего изображения всегда приводит к увеличению резкости его фрагментов и, как следствие, к улучшению их различимости. Надо отметить, что за счет увеличения контрастности увеличивается или уменьшается яркость всех пикселей фрагмента, в то время как увеличение резкости не изменяет яркость пикселей фрагмента, за исключением тех пикселей, которые находятся вблизи его границы.

Методы увеличения контрастности

Большинство методов основано на преобразовании шкалы яркости, при котором яркость пикселя преобразованного изображения $z'(x, y)$ зависит от яркости только соответствующего пикселя исходного изображения $z(x, y)$, что позволяет перед обработкой сформировать массив соответствия яркостей согласно заданной функции преобразования $z' = f(z)$. Такой массив значительно сокращает время обработки, так как после его формирования собственно обработка текущего пикселя исходного изображения сводится к присвоению соответствующему пикселю преобразованного изображения яркости, равной значению элемента массива с номером, равным яркости текущего пикселя исходного изображения.

При функциональном преобразовании яркости пикселей преобразованного изображения не зависят от гистограммы яркости исходного изображения, и формирование значений z' массива соответствия яркостей производится последовательной подстановкой целочисленных значений яркости z в функцию преобразования шкалы яркости $f(z)$.

При гистограммном преобразовании вид функции $f(z)$ зависит от значений гистограммы яркости исходного изображения, и перед формированием массива соответствия яркостей необходимо построить нормализованную гистограмму яркости исходного изображения. Заметим, что нормализованная гистограмма изображения $p(z)$

является дискретной функцией, значение которой для z_i представляет собой оценку вероятности того, что яркость случайно выбранного пикселя равна z_i .

Если глобальная контрастность изображения меньше, чем максимально возможная, то увеличение контрастности изображения можно получить линейным растяжением шкалы яркости [13] в виде $z' = \frac{z - z_{\min}}{C_{\text{отн}}}$, где z, z' — яркость пикселя до и после преобразования.

При $C_{\text{отн}}$, близкой к единице, линейное растяжение шкалы яркости не приведет к заметному увеличению контраста, но если известно, что плохо различимые фрагменты имеют среднюю яркость, то можно выполнить усечение шкалы яркости до требуемого диапазона с последующим кусочно-линейным преобразованием полученной шкалы [12]. В результате пиксели, яркость которых находится выше или ниже выбранного диапазона, получают соответственно максимально и минимально возможную яркость. Недостатком этого метода является полное слияние фрагментов, находящихся вне выбранного диапазона яркости.

Нелинейное преобразование шкалы яркости [14] позволяет увеличить контрастность в локальном диапазоне яркостей за счет снижения контрастности в других диапазонах. Например, если известно, что плохо различимы фрагменты низкой яркости, то повышение контрастности темных фрагментов за счет понижения контрастности ярких фрагментов можно получить в результате применения гамма-коррекции (степенного преобразования) яркости $z' = z_m z_{\text{отн}}^n$ при $n = 0,1 \dots 0,9$, где $z_{\text{отн}} = \frac{z}{z_m}$ — относительная яркость. Обратный результат дает преобразование при $n = 2 \dots 10$.

Одновременно увеличить контрастность темных и светлых фрагментов изображения за счет частичного слияния фрагментов средней яркости можно степенным преобразованием со смещенным нулем [12] $z' = 0,5z_m(1 + (2z_{\text{отн}} - 1)^n)$ для n нечетной степени.

Другим методом, позволяющим одновременно увеличить различимость как темных, так и светлых фрагментов, является соляризация [13], при которой преобразование шкалы яркости имеет вид

$$z' = 4z_{\text{отн}}(z_m - z). \quad (3)$$

Функция (3) является квадратичной параболой относительно z , параметры которой подобраны так, чтобы $z' = z_m$ для $z = 0,5z_m$. В результате преобразования пиксели, имеющие на исходном изображении яркость, симметричную относительно середины шкалы, приобретают одинако-

вую яркость, т. е. фрагменты, имеющие близкую яркость как в темной, так и в светлой области шкалы, разнесутся по шкале на достаточное для увеличения их различимости расстояние, а фрагменты средней яркости приобретают яркость, близкую к максимальной, и частично сливаются. Метод называется «соляризация», так как создается впечатление, что светлые фрагменты «загорели» на солнце.

Увеличение различимости фрагментов изображения можно получить и путем эквализации [15], или выравнивания, гистограммы, т. е. такого преобразования шкалы яркости, при котором гистограмма результирующего изображения будет приближаться по форме к равномерной. Метод эквализации гистограммы основан на предположении, что наибольшая контрастность достигается на изображении, гистограмма которого представляет равномерное распределение пикселей по яркостям на всем возможном диапазоне. Дискретное преобразование шкалы яркости имеет вид

$$z'_i = z_m \sum_{k=0}^i p(z_k), \text{ где } z'_i \text{ — значение элемента}$$

преобразованной шкалы яркости, соответствующее i -й яркости исходной шкалы; $p(z_k)$ — нормализованная гистограмма яркости исходного изображения ($k = 0 \dots 255$). В результате эквализации гистограммы изображения происходит повышение контрастности некоторых фрагментов за счет частичного слияния других фрагментов, причем заранее предсказать результат достаточно сложно, однако в большинстве случаев различимость улучшается.

Существуют и другие методы увеличения контраста, например, преобразование гистограммы к заданному виду на основе кумулятивных гистограмм [15] или адаптивное увеличение контрастности на основе локальных статистических характеристик [15]. Однако эти методы требуют ввода большого числа параметров и значительных временных затрат на обработку изображения.

В качестве примеров изображений с недостаточной различимостью фрагментов представлены изображения пластикового контейнера (рис. 1) и транспондерной карты (рис. 2), полученные камерой FLIR SC7600 Orion (размер матрицы 640×512 пикселей) в среднем спектральном ИК-диапазоне $1,5 \dots 5,1$ мкм без использования ИК-фильтра. Оба изображения являются 8-битными и занимают весь диапазон яркости ($0 \dots 255$), но контрастность объектов внутри контейнера и текста на транспондерной карте недостаточны.

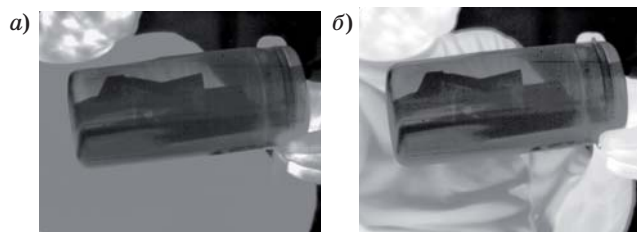
Результаты увеличения контрастности степенным преобразованием со смещенным нулем и эквализацией гистограммы изображения, показанного на рис. 1, приведены на рис. 3, а и б.



■ **Рис. 1.** Исходное изображение контейнера, полученное в ИК-диапазоне



■ **Рис. 2.** Исходное изображение карты, полученное в ИК-диапазоне



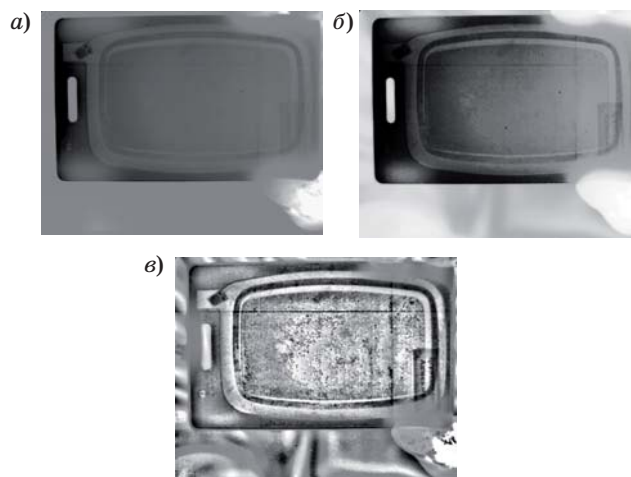
■ **Рис. 3.** Результат увеличения контрастности изображения (рис. 1) степенным преобразованием со смещенным нулем (а) и эквализацией гистограммы яркости (б)

В данном случае первый метод позволил увеличить контрастность больше, чем второй, но естественность изображения за счет сохранения складок одежды лучше сохранил второй метод.

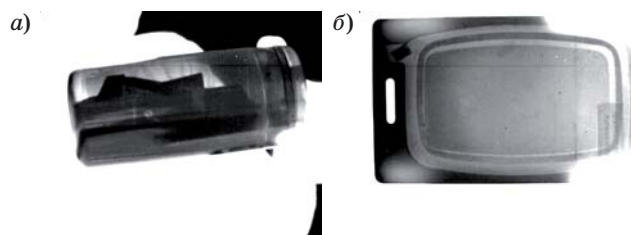
Результат увеличения контрастности степенным преобразованием со смещенным нулем изображения, показанного на рис. 2, приведен на рис. 4, а. В данном случае, хотя контрастность и повысилась, различимость текста недостаточна.

Результат увеличения контрастности эквализацией гистограммы изображения, показанного на рис. 2, приведен на рис. 4, б. По сравнению с изображением на рис. 4, а, различимость текста несколько возросла.

Результат адаптивной эквализации изображения, показанного на рис. 2, приведен на рис. 4, в. Данный метод позволил существенно повысить различимость текста, но потребовал значительно больше времени на обработку, как и большинство адаптивных методов.



■ **Рис. 4.** Результат увеличения контрастности изображения (рис. 2) степенным преобразованием со смещенным нулем (а); эквализацией гистограммы яркости (б); адаптивной эквализацией гистограммы яркости (в)



■ **Рис. 5.** Результат увеличения контрастности фрагмента (текста): а — на рис. 1; б — на рис. 2 — кусочно-линейным преобразованием шкалы яркости

Проанализировав на гистограмме распределение яркостей по пикселям в области, различимость которой желательно повысить, можно выполнить кусочно-линейное преобразование шкалы яркости в заданном диапазоне. Результат обработки для изображений, показанных на рис. 1 и 2, представлен соответственно на рис. 5, а (диапазон 5...30) и 5, б (диапазон 10...40), из которых видно, что увеличилась контрастность фрагментов, плохо различимых на исходных изображениях. Применение данного метода в автоматическом режиме затруднено, так как диапазон преобразования шкалы яркости зависит от яркости пикселей, расположенных в интересующей нас области.

Методы увеличения резкости

Из выражения (2) следует, что увеличение резкости возможно и при уменьшении толщины линии границы $l_{\max} - l_{\min}$. Этот результат можно получить, уменьшая размер изображения [12].

Однако данный подход неприменим для мало-размерных фрагментов, так как значительное уменьшение их размеров может привести к снижению различимости или даже к их исчезновению.

Другой способ визуального увеличения резкости без изменения контрастности заключается в подчеркивании границ контурной линии, отделяющей фрагменты друг от друга, т. е. изменении яркости тех пикселей, которые находятся на границе линии контура, отделяющей один фрагмент от другого. Если яркость темных граничных пикселей понижается, а яркость светлых — повышается, то в результате локальной контрастности S увеличивается при сохранении толщины контура. Ясно, что увеличение резкости таким способом возможно только при условии, что яркость граничных пикселей находится в среднем диапазоне шкалы яркости.

Основная проблема, возникающая при использовании данного подхода, заключается в следующем. С одной стороны, требуется увеличить резкость информативных фрагментов с малой разностью яркостей, а с другой — не изменять резкость хорошо различимых фрагментов и не увеличивать шум, если он имеется.

Для вычисления уровня увеличения резкости можно использовать вторую производную функции яркости изображения [12], т. е. лапласиан. В разностной форме лапласиан центрального пикселя для окрестности 3×3 определяется матрицей $\mathbf{H}_L = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$. Тогда

$$z' = z - k_L z_L, \quad (4)$$

где k_L — коэффициент усиления резкости лапласианом ($k_L = 0 \dots 5$); z_L — результат свертки окрестности 3×3 пикселя яркостью z с \mathbf{H}_L . Если перепадов яркости в окрестности нет, то $z_L = 0$ и $z' = z$. Если центр окрестности находится в начале границы перехода от низкой яркости к высокой, то $z_L > 0$ и, согласно (4), $z' < z$. Если центр окрестности — в конце этой границы, то $z_L < 0$ и, соответственно, $z' > z$. Следовательно, диапазон яркости границы увеличивается приблизительно на $2k_L z_L$.

Подчеркивания границ фрагментов можно получить, используя метод нечеткого маскирования [15]. Например, в результате свертки изображения с усредняющей матрицей гауссиана можно получить размытое изображение. Матрица

гауссиана имеет вид $\mathbf{H}_G = C_G \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}$. Нормирующий коэффициент $C_G = 1/16$ сохраняет яр-

кость пикселя без изменений, если перепадов яркости в его окрестности нет. Тогда

$$z' = z_G + k_G(z - z_G), \quad (5)$$

где k_G — коэффициент усиления резкости гауссианом ($k_G = 1 \dots 10$); z_G — яркость соответствующего пикселя изображения, полученного в результате свертки изображения с гауссианом.

Если перепадов яркости в окрестности центрального пикселя яркостью z нет, т. е. $z = z_G$, то $z' = z$ и изменений яркости пикселя не происходит. Если центр окрестности — в начале границы перехода от низкой яркости к высокой, то $z_G > 0$ и, согласно (5), $z' < z$. Если центр окрестности — в конце этой границы, то $z_G < 0$ и, соответственно, $z' > z$. Следовательно, диапазон яркости границы увеличивается приблизительно на $2(k_G - 1)(z_G - z)$.

Недостатком определения яркости текущего пикселя по выражениям (4) и (5) для увеличения резкости является постоянство коэффициента усиления для всего изображения. В результате степень усиления резкости остается одинаковой при любом перепаде яркости в окрестности текущего пикселя. Желательно иметь возможность изменять коэффициент усиления резкости в зависимости от величины разброса яркостей в окрестности, т. е. использовать методы адаптивного вычисления коэффициента для каждого пикселя обрабатываемого изображения.

Коэффициент усиления резкости в (5) можно изменять в зависимости от дисперсии яркости окрестности [12], например: $k_z = \frac{k_0}{\sqrt{D_z}}$, где k_0 —

задаваемая оператором константа ($k_0 = 1 \dots 255$); D_z — дисперсия яркости окрестности текущего пикселя обрабатываемого изображения. Размер окрестности следует выбирать так, чтобы статистическая оценка яркости была достоверной. В общем случае чем меньше D_z , тем больше коэффициент усиления. Если $D_z = 0$, то следует установить $k_z = 1$, и тогда яркость равномерных участков изображения не будет изменяться.

Хорошие результаты дает адаптивное увеличение резкости на основе локального контраста,

который вычисляется как [12] $C_z = \frac{|z - z_c|}{z + z_c}$, где

z_c — средняя яркость некоторой окрестности пикселя яркостью z . Нелинейное усиление локального контраста задается как $C_z^* = f(C_z)$, где $f(C_z)$ — нелинейная, монотонная функция, которая удовлетворяет условиям $f(C_z) > C_z$, $C_z = 0 \dots 1$ и $f(C_z) = 0 \dots 1$. В качестве функции f можно выбрать логарифмическую функцию $C_z^* = \ln(C_z)$ или степенную $C_z^* = C_z^n$, где $n = 0, 1 \dots 1, 0$. Результирующую

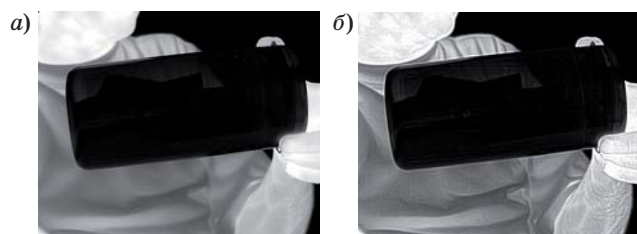
щая яркость центрального пикселя окрестности вычисляется как

$$z' = \begin{cases} z_c \frac{1 - C_z^*}{1 + C_z^*}, & z < z_c \\ z_c \frac{1 + C_z^*}{1 - C_z^*}, & z > z_c \end{cases} \quad (6)$$

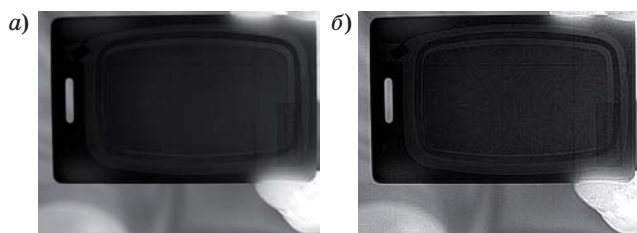
Из (6) следует, что при $n = 1$ $C_z^* = C_z$ и, соответственно, $z' = z$. Чем меньше n , тем больше C_z^* относительно C_z , а два варианта вычисления z' в зависимости от соотношения z и z_c позволяют увеличить резкость границы между фрагментами с близкой яркостью.

Результаты повышения резкости с применением гауссиана и локального контрастирования изображений, показанных на рис. 1 и 2, приведены соответственно на рис. 6, а и б и 7, а и б. Если обработка изображения, показанного на рис. 1, указанными методами несколько повышает различимость содержимого контейнера (рис. 6), то результат обработки изображения, показанного на рис. 2, скорее снижает различимость текста (рис. 7) за счет излишнего повышения резкости окружающих его фрагментов.

Оценить результаты повышения различимости можно как визуально, так и используя различные метрики качества, из которых наиболее популярной в последнее время является мера структурного подобия SIMM [16]. Эта мера требует для сравнения наличия двух изображений одной и той же сцены и сочетает в себе оценку корреляции, сходство средних значений и сход-



■ **Рис. 6.** Результат увеличения резкости изображения (рис. 1) гауссианом (а) и локальным контрастированием (б)



■ **Рис. 7.** Результат увеличения резкости изображения (рис. 2) гауссианом (а) и локальным контрастированием (б)

ство контрастов сравниваемых изображений. Применение количественной оценки качества обработанного изображения дает возможность повысить объективность оценки эффективности применения различных методов, а также автоматизировать процесс выбора наиболее подходящего метода и настройки его параметров.

Хотя увеличение резкости и может повысить различимость фрагментов изображения, требуется тщательный подбор параметров обработки, так как излишнее подчеркивание может привести к ухудшению различимости. Кроме этого, при увеличении резкости время обработки изображения существенно больше, чем при увеличении контрастности. Это объясняется выполнением операции свертки, а для адаптивных методов — вычислением локальных статистических характеристик.

Необходимо отметить, что наряду с приведенными выше методами повышения различимости известны и другие подходы, дающие аналогичные результаты. Например, метод сверхразрешения [17] и метод слепой деконволюции [18]. Однако для реализации указанных методов необходима дополнительная априорная информация о функции рассеяния точки, геометрических размерах и статистических характеристиках яркости фрагментов. Кроме того, данные методы реализуются с применением преобразования Фурье, что требует значительного времени на обработку изображений большого размера.

Заключение

Повышения различимости фрагментов изображений, полученных с видеокamer, работающих в ИК-диапазоне электромагнитного излучения, следует в первую очередь добиваться путем подбора узкополосных ИК-фильтров. При необходимости улучшения различимости фрагментов изображений программными средствами наиболее перспективными можно считать методы повышения контрастности.

Решение вопросов, связанных с выбором наиболее эффективных методов повышения контрастности изображений, как и вопросов автоматизации выбора параметров в этих методах, требует исследования зависимости качества исходных изображений от условий съемки.

Литература

1. Анитропов Р. В. и др. Анализ параметрической модели обобщенного триплета и его применение в оптико-информационных системах / Р. В. Анитропов, И. Г. Бронштейн, В. Н. Васильев, В. А. Зверев,

- И. Л. Лившиц, М. Б. Сергеев, Унчун Чо // Информационно-управляющие системы. 2010. № 1. С. 6–13.
2. **Анитропов Р. В.** и др. Упрощение оптической системы приемного объектива в цифровых камерах за счет аппаратной и программной компенсации аберраций / Р. В. Анитропов, В. Н. Васильев, В. А. Зверев, И. Л. Лившиц, М. Б. Сергеев, Унчун Чо // Информационно-управляющие системы. 2011. № 1. С. 57–61.
 3. **Васильев В. Н.** и др. Гибридный микрообъектив для оптико-информационных систем комбинационного рассеяния / В. Н. Васильев, И. Л. Лившиц, М. Б. Сергеев, Е. М. Соколова // Информационно-управляющие системы. 2012. № 5. С. 2–6.
 4. **Gaussorgues Gilbert.** La Thermographie Infrarouge. Principes, Technologie, Applications. 4^{ème} éd. — Tec & Doc, 1999. — 587 p.
 5. **Трухачев В. В., Поляков С. А.** Повышение различимости объектов на изображениях, формируемых ИК-системами // Фундаментальные исследования. 2013. № 10. С. 55–58.
 6. Beratung und Lieferung von OEM-Komponenten. <http://www.eureca.de/neu-german/index.html> (дата обращения: 20.09.2016).
 7. **Бронштейн И. Г.** и др. Теория и практика расчета малогабаритных объективов для оптико-информационных систем / И. Г. Бронштейн, И. Л. Лившиц, М. Б. Сергеев, Унчун Чо // Информационно-управляющие системы. 2007. № 5. С. 52–55.
 8. **Лившиц И. Л.** и др. Характеристики программного обеспечения для проектирования дифракционно-ограниченных оптико-электронных систем / И. Л. Лившиц, М. А. Пашковский, И. Г. Бронштейн, М. Б. Сергеев, Унчун Чо // Информационно-управляющие системы. 2008. № 3. С. 19–22.
 9. **Васильев В. Н.** и др. Адаптация схем классических широкоугольных объективов для использования в цифровых камерах / В. Н. Васильев, А. И. Драгунов, И. Л. Лившиц, М. Б. Сергеев, Е. М. Соколова // Информационно-управляющие системы. 2012. № 6. С. 2–6.
 10. **Колбанев М. Ю., Рогачев В. А.** Анализ проблемы обнаружения в инфракрасных системах // Информационно-управляющие системы. 2010. № 5. С. 51–54.
 11. **Безбородов В. Г., Дукарский О. М., Серебряков В. Г.** Развитие технологий информационного обеспечения и мониторинга для задач управления территориями // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ». 2015. Т. 7. № 4. <http://naukovedenie.ru/PDF/122EVN415/pdf> (дата обращения: 20.09.2016). doi:10.15862/122EVN415.
 12. **Соловьев Н. В., Сергеев А. М.** Улучшение качества растровых изображений. — Lambert Academic Publishing, 2015. — 104 с.
 13. **Сергеев М. Б., Соловьев Н. В., Стадник А. И.** Методы повышения контрастности растровых изображений для систем цифровой обработки видеoinформации // Информационно-управляющие системы. 2007. № 1. С. 2–7.
 14. **Ерош И. Л., Сергеев М. Б., Соловьев Н. В.** Обработка и распознавание изображений в системах превентивной безопасности: учеб. пособие. — СПб.: ГУАП, 2005. — 154 с.
 15. **Richard E. Woods, Rafael C. Gonzalez.** Digital Image Processing. Second Ed. — Prentice Hall, 2002. — 813 p.
 16. **Wang Z., Bovik A. C.** A Universal Image Quality Index // IEEE Signal Processing Letters. Mar. 2002. Vol. 9. P. 81–84.
 17. Методы компьютерной обработки изображений / под ред. В. А. Сойфера. — М.: Физматлит, 2003. — 784 с.
 18. **Журавель И. М.** Краткий курс теории обработки изображений. <http://matlab.exponenta.ru/imageprocess/book2/index.php> (дата обращения: 22.09.2016).

UDC 004.042

doi:10.15217/issn1684-8853.2016.6.2

Improving the Legibility of Informative Fragments of Monochrome Infrared Images

Vostrikov A. A.^a, PhD, Tech., Associate Professor, vostrikov@mail.ru

Kuchin N. V.^a, PhD, Tech., Associate Professor, nick.kuchin@yandex.ru

Petrenko E. A.^a, Acting Head of Labs, petrenko_elene@mail.ru

Sergeev A. M.^a, Senior Lecturer, asklab@mail.ru

Solovyev N. V.^a, PhD, Tech., Associate Professor, famsol@yandex.ru

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

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

Purpose: We demonstrate the ways to improve the legibility of informative fragments of monochrome images in the infrared range. **Methods:** We increase the contrast and sharpness of the images, taking into account the parameter variability and the time necessary to process infrared images of various sizes. **Results:** After analyzing the local contrast of infrared images, algorithmic complexity and the possibility to implement various methods of automatically improving the legibility of the fragments, we conclude that the best way to improve the legibility is choosing proper hardware, optical systems and narrowband infrared filters. When necessary, the legibility

can be improved by software tools, namely by the methods of improving the contrast by per-pixel conversion. **Practical relevance:** For infrared images obtained under difficult conditions, the legibility of informative fragments can be improved by fine-tuning the adjustable parameters of the methods used to enhance the contrast. This is demonstrated by the results of software-based improvement of the object legibility on the sample images.

Keywords — Video Monitoring Systems, Video Systems, Aerospace Imagery, IR Range, Monochrome Image, Monochrome Image Fragment, Legibility Improvement.

References

- Anitropov R. V., Bronshtein I. G., Vasilev V. N., Zverev V. A., Livshits I. L., Sergeev M. B., Cho Unchung. Analysis of a Parametric Model of the Generalized Triplet and its Application in Optical Information Systems. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2010, no. 1, pp. 6–13 (In Russian).
- Anitropov R. V., Vasilev V. N., Zverev V. A., Livshits I. L., Sergeev M. B., Cho Unchung. Simplifying Optical Scheme of the Digital Camera Receiving Lens Using Hardware and Software Aberration Compensation. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2011, no. 1, pp. 57–61 (In Russian).
- Vasilev V. N., Livshits I. L., Sergeev M. B., Sokolova E. A. Hybrid Microscope Objective for Optical Information Systems of Raman Scattering. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2012, no. 5, pp. 2–6 (In Russian).
- Gaussorgues Gilbert. *La Thermographie Infrarouge. Principes, Technologie, Applications*. 4^{ème} éd. Tec & Doc, 1999. 587 p. (In French).
- Trukhachev V. V., Polyakov S. A. Increase Visibility of the Objects on the Images Produced by the IR Systems. *Fundamental'nye issledovaniya* [Fundamental Research], 2013, no. 10, pp. 55–58 (In Russian).
- Beratung und Lieferung von OEM-Komponenten*. Available at: <http://www.eureca.de/neu-german/index.html> (accessed 20 September 2016).
- Bronshtein I. G., Livshits I. L., Sergeev M. B., Cho Unchung. The Theory and Practice of the Design of Small-Size Lenses for Television Information Systems. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2007, no. 5, pp. 52–55 (In Russian).
- Livshits I. L., Pashkovskii M. A., Bronshtein I. G., Sergeev M. B., Cho Unchung. Characteristic Properties of Optics-Electronics Design Software for Diffraction-Limited Systems. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2008, no. 3, pp. 19–22 (In Russian).
- Vasilev V. N., Dragunov A. I., Livshits I. L., Sergeev M. B., Sokolova E. A. Adaptation of Classical Wide Angle Lenses for their Application in Digital Cameras. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2012, no. 6, pp. 2–6 (In Russian).
- Kolbanev M. O., Rogachev V. A. An Analysis of the Detection Problem in Infrared Systems. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2010, no. 5, pp. 51–54 (In Russian).
- Bezborodov V. G., Dukarsky O. M., Serebryakov V. G. Development of Information and Monitoring Technologies for the Management of Territories. *Internet-zhurnal "NAUKOVEDENIE"*, 2015, vol. 7, no. 4. Available at: <http://naukovedenie.ru/PDF/122EVN415/pdf> (accessed 20 September 2016) (In Russian). doi:10.15862/122EVN415
- Solovjov N. In., Sergeev A. M. *Uluchshenie kachestva rastrovyykh izobrazhenii* [Improving the Quality of Raster Images]. Lambert Academic Publishing, 2015. 104 p. (In Russian).
- Sergeev M. B., Solovjov N. V., Stadnik A. I. Methods to Increase Raster Image Contrast for Systems of Digital Video Processing. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2007, no. 1, pp. 2–7 (In Russian).
- Erosh I. L., Sergeev M. B., Solovjov N. V. *Obrabotka i raspoznavanie izobrazhenii v sistemakh preventivnoi bezopasnosti* [Processing and Image Recognition in Systems Preventive Security]. Saint-Petersburg, GUAP Publ., 2005. 154 p. (In Russian).
- Richard E. Woods, Rafael C. Gonzalez. *Digital Image Processing*. Second Ed. Prentice Hall, 2002. 813 p.
- Wang Z., Bovik A. C. A Universal Image Quality Index. *IEEE Signal Processing Letters*, Mar. 2002, vol. 9, pp. 81–84.
- Metody komp'yuternoi obrabotki izobrazhenii* [Methods of Computer Image Processing]. Ed. by V. A. Soifer. Moscow, Fizmatlit Publ., 2003. 784 p. (In Russian).
- Zhuravel I. M. *Kratkii kurs teorii obrabotki izobrazhenii* [Short Course in the Theory of Image Processing]. Available at: <http://matlab.exponenta.ru/imageprocess/book2/index.php> (accessed 22 September 2016).

МЕТОД СТРУКТУРНОЙ АДАПТАЦИИ ДИСКРЕТНЫХ АЛГОРИТМОВ ОБЪЕДИНЕННОГО ПРИНЦИПА МАКСИМУМА В ЗАДАЧАХ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ

А. А. Костоготов^а, доктор техн. наук, профессор

А. А. Кузнецов^б, канд. техн. наук, доцент

С. В. Лазаренко^в, канд. техн. наук

И. В. Дерябкина^а, канд. техн. наук

^аРостовский государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону, РФ

^бВоенно-воздушная академия им. профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина, Воронеж, РФ

^вДонской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, РФ

Постановка проблемы: несоответствие модели движения наблюдаемому изменению состояния приводит к расходимости и даже срыву алгоритма оценивания при сопровождении маневрирующей цели, что определяет актуальность разработки адаптивных фильтров. Один из традиционных вариантов адаптации фильтров заключается в использовании совокупности идентичных моделей с различными параметрами. Это позволяет учесть неопределенности статистического или геометрического характера для кинематических моделей при описании маневра. Однако большое разнообразие видов маневра приводит к сложным вариантам реализации фильтров, построенных на базе этого подхода. **Цель исследования:** решение проблемы адаптации дискретной математической модели к динамике наблюдаемой системы как результата структурного синтеза, который получается из решения обратной задачи динамики на основе объединенного принципа максимума. **Результаты:** разработана динамическая модель движения системы в форме векторного разностного уравнения, которая отличается от известных структурой и размерностью матриц состояний и возмущений за счет применения модели ускорения, полученной с использованием вариационного принципа Гамильтона — Остроградского. Применение дискретного метода инвариантного погружения позволяет разработать новый алгоритм оценивания параметров движения маневрирующей цели. Математическое моделирование показало, что в сравнении с традиционной моделью ускорения с экспоненциальной автокорреляцией новое решение обеспечивает повышение точности оценивания при меньшем объеме вычислительных затрат. **Практическая значимость:** разработанный метод адаптации структуры алгоритма оценивания приводит к выигрышу в точности оценивания при снижении объема вычислительных затрат в сравнении с традиционными.

Ключевые слова — вектор возмущений, модель движения в дискретном времени, матрица перехода, объединенный принцип максимума, инвариантное погружение, фильтр Калмана.

Введение

Работа является продолжением исследований, связанных с методологией решения обратных задач динамики управляемых летательных аппаратов под общим названием «объединенный принцип максимума» [1–7], которая приводит к эффективному решению задачи сопровождения маневрирующих летательных аппаратов. Эффективность понимается в смысле снижения объема вычислительных затрат и высокой точности оценок параметров движения целей на этапе маневра в сравнении с традиционными фильтрами сопровождения [1, 5–7]. Такой положительный эффект достигается за счет использования разработанных динамических моделей движения.

Адекватность математической модели динамической системы является одним из главных факторов, который определяет точность оценки параметров движения [8, 9]. Ее несоответствие действительному изменению состояния может приводить не только к увеличению погреш-

ности оценивания, но и срыву сопровождения воздушного объекта [10, 11]. Неточность математических моделей связана с априорной неопределенностью относительно динамики движения и вида маневра цели, следствием чего являются ошибки при выборе рационального варианта уравнения состояния [9, 11–14]. В результате возникает необходимость адаптации математической модели к наблюдаемой динамике. Данная проблема может быть решена уточнением параметров модели из условия минимума невязки наблюдений [9]. В таком случае вектор пространства состояний исходной задачи оценивания расширяется, и вычислительные затраты возрастают. Часто с ростом адекватности моделей увеличивается число параметров, что может делать неприемлемым их использование в задачах сопровождения маневрирующих летательных аппаратов в реальном масштабе времени [11, 15].

В рамках теории статистического синтеза адаптация алгоритма оценивания к неизвестному маневру цели реализуется на основе пред-

ставления процесса оценивания как случайного процесса с изменяющимся уровнем шума или несколькими дискретными уровнями. Другой подход к адаптации основывается на оценивании неизвестного входного управления, которое полагается постоянным в течение некоторого времени, требует обнаружения и оценки для коррекции состояния [11]. Несмотря на то, что в ряде случаев эти приемы обеспечивают получение удовлетворительных оценок, причина расходимости и срыва алгоритмов оценивания для многих классов современных маневрирующих объектов остается. Это связано с описанием маневров как случайных процессов, которые позволяют получать оценки для случая движения с «приблизительно постоянным ускорением» [9, 11–14]. Если наблюдаемая динамика не соответствует такому предположению, то необходимо использовать многорежимную модель [9, 11].

Достаточно полное математическое описание движения летательных аппаратов может быть получено с использованием законов механики, которые основаны на вариационных принципах [16]. Однако в общем случае для определения структуры неизвестных сил, которые приводят к наблюдаемому изменению состояния, необходимо решить обратную задачу динамики [1, 2]. В этом контексте решение обозначенной проблемы рассматривается как результат структурного синтеза на основе объединенного принципа максимума [17, 18].

В работе [6] с использованием процедуры расширения пространства состояний из динамической модели движения объединенного принципа максимума получена универсальная модель с адаптацией к маневру цели в форме векторного дифференциального уравнения первого порядка. Это позволяет использовать метод инвариантного погружения [19] для синтеза в непрерывном времени нового фильтра сопровождения калмановской структуры. Он выгодно отличается от традиционных точностью оценивания и небольшим объемом вычислительных затрат.

Практическая реализация полученного результата [6] связана с построением динамической модели движения в дискретном времени и рациональным выбором варианта построения фильтра сопровождения. Адаптация дискретных алгоритмов оценки связана с изменением параметров матриц состояния и формирующего шума, полученных на этапе структурного синтеза динамической модели движения.

Цель работы — разработка метода адаптации структуры дискретных алгоритмов оценки параметров движения в условиях неопределенности маневра на основе объединенного принципа максимума.

Постановка задачи структурного синтеза дискретного фильтра сопровождения

Пусть динамика системы в дискретном времени задана с точностью до структуры в общем случае нелинейной вектор-функции $\mathbf{F}(\mathbf{x}, k) \in R^r$ разностным уравнением [10, 11]

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{F}(\mathbf{x}, k) + \mathbf{u}(k), \quad (1)$$

где $\mathbf{x}(k) \in R^r$ — вектор состояния; $k = \overline{0, N}$ — текущий момент времени; $\mathbf{u}(k) \in R^r$ — вектор возмущений.

Уравнение наблюдений имеет вид [10, 11]

$$\mathbf{y}(k) = \mathbf{h}(\mathbf{x}, k) + \xi(k), \quad (2)$$

где $\mathbf{h}(\mathbf{x}, k) \in R^r$ — известная вектор-функция; $\xi(k) \in R^r$ — вектор белого гауссова шума.

В пространстве наблюдений выбран целевой функционал [1, 2]

$$J = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^N [\mathbf{y}(k) - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}, k)]^T \mathbf{R}_\xi^{-1} [\mathbf{y}(k) - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}, k)], \quad (3)$$

где $\mathbf{R}_\xi^{-1} \in R^{r \times r}$ — диагональная весовая матрица, характеризующая интенсивность помех в канале наблюдений; знак $\hat{}$ означает оценку.

Требуется из условия минимума целевого функционала (0) найти оценки вектора состояния $\hat{\mathbf{x}}(k)$ для текущего момента времени k [19].

Синтез дискретного фильтра сопровождения

В работе [6] на основе объединенного принципа максимума получена динамическая модель движения вида

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{G}\eta(t), \quad \mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}^0, \quad (4)$$

где $\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$, $x_1 = \hat{x}$, $x_2 = \dot{\hat{x}}$;

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} x_1 \\ -\frac{1}{\lambda R_\xi} \frac{|x_2| x_2}{|x_1|} \end{bmatrix} \quad (5)$$

— вектор-функция системы; $\mathbf{G} = \begin{bmatrix} 0 \\ \zeta \end{bmatrix}$ — вектор интенсивности возмущений, ζ — параметр интенсивности формирующего шума; $\eta(t)$ — центрированный относительно $\mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}, t)$ случайный процесс.

Необходимо по непрерывной модели (5) построить модель (1) в дискретном времени

$$\mathbf{F}(\mathbf{x}, k) = \Phi \mathbf{x}(k), \quad (6)$$

где Φ — матрица перехода для уравнения состояния. Из (6) следует, что для широко распростра-

ненного случая, когда выполняется с достаточной степенью точности условие $\beta = -\frac{1}{\lambda R_{\xi}} \frac{|x_2|}{|x_1|} = \text{const}$:

$$\mathbf{x}(k + \Delta T) = \mathbf{e}^{\mathbf{A}\Delta T} + \int_t^{t+\Delta T} \mathbf{e}^{\mathbf{A}(t+\Delta T-\tau)} \mathbf{G}\eta(\tau) d\tau, \quad (7)$$

где ΔT — фиксированный интервал дискретизации; $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & \beta \end{bmatrix}$. Матрица перехода и вектор возмущений имеют вид

$$\Phi = \mathbf{e}^{\mathbf{A}\Delta T}, \mathbf{u}(k) = \int_{k\Delta T}^{(k+1)\Delta T} \mathbf{e}^{\mathbf{A}((k+1)\Delta T-\tau)} \mathbf{G}\eta(\tau) d\tau. \quad (8)$$

Поскольку в соответствии с теоремой Гамильтона — Кэли всякая квадратная матрица удовлетворяет своему характеристическому уравнению, то выражения (8) можно определить с использованием собственных значений матрицы \mathbf{A} и матричных полиномов [20]. Вычисление матричной экспоненты приводит к матрице перехода состояний, которая определяется двумя параметрами

$$\Phi(\Delta T, \beta) = \begin{bmatrix} 1 & \frac{e^{\beta\Delta T} - 1}{\beta} \\ 0 & e^{\beta\Delta T} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

а вектор возмущений — сверткой:

$$\mathbf{u}(k) = \int_{k\Delta T}^{(k+1)\Delta T} \begin{bmatrix} 1 & \frac{e^{\beta\Delta T} - 1}{\beta} \\ 0 & e^{\beta\Delta T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \zeta \end{bmatrix} \eta(\tau) d\tau =$$

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} \frac{\zeta^2 R_{\eta}}{\beta} \left(\frac{e^{2\beta\Delta T} - 1}{2\beta^2} + \frac{2 - 2e^{\beta\Delta T}}{\beta^2} + \frac{\Delta T}{\beta} \right) & \frac{\zeta^2 R_{\eta}}{\beta} \left(\frac{e^{2\beta\Delta T} - 1}{2\beta} + \frac{1 - e^{\beta\Delta T}}{\beta} \right) \\ \frac{\zeta^2 R_{\eta}}{\beta} \left(\frac{e^{2\beta\Delta T} - 1}{2\beta} + \frac{1 - e^{\beta\Delta T}}{\beta} \right) & \frac{\zeta^2 R_{\eta}}{\beta} \left(\frac{e^{2\beta\Delta T} - 1}{2} \right) \end{bmatrix} \quad (12)$$

— ковариационная матрица вектора возмущений.

Результаты математического моделирования

В качестве примера рассматривается цель, которая движется с постоянным направлением и скоростью на плоскости в течение 50 с. Маневр типа «S-разворот» начинается на 51-й с и длится 31 с [11, 14]. Интенсивность маневра $353,5 \text{ мс}^{-2}$ [1]. Наблюдается наклонная дальность до летательного аппарата; начальные условия $x_1(0) = \hat{x}_1(0) = 2000 \text{ м}$, $x_2(0) = \hat{x}_2(0) = 198 \text{ мс}^{-1}$.

$$= \int_{k\Delta T}^{(k+1)\Delta T} \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{bmatrix} \eta(\tau) d\tau, \quad (10)$$

где $n_1 = \zeta \frac{e^{\beta} - 1}{\beta}$, $n_2 = \zeta e^{\beta}$.

Решение экстремальной задачи (1)–(3) с использованием дискретного варианта метода инвариантного погружения приводит к алгоритму калмановского типа [12]

$$\hat{\mathbf{x}}(k+1|k) = \Phi(\Delta T, \beta) \hat{\mathbf{x}}(k|k);$$

$$\hat{\mathbf{x}}(k|k) = \hat{\mathbf{x}}(k|k-1) + \mathbf{K}(k|k-1) [\mathbf{y}(k) - \mathbf{h}(\mathbf{x}|k)];$$

$$\mathbf{K}(k|k-1) = \mathbf{P}(k|k-1) \frac{\partial \mathbf{h}^T}{\partial \hat{\mathbf{x}}} \left[\frac{\partial \mathbf{h}}{\partial \hat{\mathbf{x}}} \mathbf{P}(k|k-1) \frac{\partial \mathbf{h}^T}{\partial \hat{\mathbf{x}}} + R_{\zeta}^2 \right]^{-1};$$

$$\mathbf{P}(k|k-1) = \Phi(\Delta T, \beta) \mathbf{P}(k-1|k-1) \Phi^T(\Delta T, \beta) + \mathbf{V}(k);$$

$$\begin{aligned} \mathbf{P}(k|k) &= \mathbf{P}(k|k-1) - \mathbf{P}(k|k-1) \frac{\partial \mathbf{h}^T}{\partial \hat{\mathbf{x}}} \times \\ &\times \left[\frac{\partial \mathbf{h}}{\partial \hat{\mathbf{x}}} \mathbf{P}(k|k-1) \frac{\partial \mathbf{h}^T}{\partial \hat{\mathbf{x}}} + R_{\zeta}^2 \right]^{-1} \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial \hat{\mathbf{x}}} \mathbf{P}(k|k-1), \quad (11) \end{aligned}$$

где $\hat{\mathbf{x}}(k+1|k)$ — оценка $\mathbf{x}(k+1)$ по всем предыдущим измерениям, включая последнее k -е значение (предсказание на шаг); $\hat{\mathbf{x}}(k|k)$ — оценка $\mathbf{x}(k)$ по всем предыдущим измерениям (фильтрация); $\mathbf{K}(k|k-1)$ — коэффициент усиления, $\mathbf{P}(k|k)$; $\mathbf{P}(k|k-1)$ — соответственно матрицы оценки и предсказания на шаг;

Наблюдения зашумлены независимым случайным процессом с нулевым средним и дисперсией $\sigma_{\xi}^2 = 2500 \text{ м}^2$. Математическое моделирование проведено для случаев поступления измерительной информации с частотой от 10 до $0,1 \text{ с}^{-1}$ [12].

Сравнение производится с фильтром Калмана, для которого

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}, \mathbf{H} = [1 \ 0 \ 0]; \quad (13)$$

ускорение описывается моделью формирующего фильтра

$$\dot{x}_3 = -\alpha \dot{x}_3 + w, \quad (14)$$

где α — постоянная времени ускорения; w — возбуждающая функция. Тогда при выборе возбуждающей функции в виде белого гауссова шума уравнения движения записываются в форме век-

торного дифференциального уравнения первого порядка, откуда [11–13]

$$\Phi = \begin{pmatrix} 1 & \Delta T & \frac{1}{\alpha^2}[-1 + \alpha \Delta T + e^{-\alpha \Delta T}] \\ 0 & 1 & \frac{1}{\alpha}[1 - e^{-\alpha \Delta T}] \\ 0 & 0 & e^{-\alpha \Delta T} \end{pmatrix}. \quad (15)$$

Вектор возмущений определяется выражением [11–13]

$$\mathbf{u}(k) = \int_{k\Delta T}^{(k+1)\Delta T} \begin{pmatrix} 1 & (k+1)\Delta T - \tau & \frac{1}{\alpha^2}[-1 + \alpha((k+1)\Delta T - \tau)] + e^{-\alpha((k+1)\Delta T - \tau)} \\ 0 & 1 & \frac{1}{\alpha}[1 - e^{-\alpha((k+1)\Delta T - \tau)}] \\ 0 & 0 & e^{-\alpha((k+1)\Delta T - \tau)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} w(\tau) d\tau. \quad (16)$$

Из (16) получены элементы ковариационной матрицы возбуждающей функции [12]

$$\begin{aligned} V_{11} &= \frac{2\alpha R_\eta}{2\alpha^5} [1 - e^{-2\alpha\Delta T} + 2\alpha\Delta T + 2\alpha^2\Delta T^2 - 4\alpha\Delta T e^{-\alpha\Delta T}]; \\ V_{12} &= \frac{2\alpha R_\eta}{2\alpha^4} \times \\ &\times [e^{-2\alpha\Delta T} + 1 - e^{-\alpha\Delta T} + 2\alpha\Delta T e^{-\alpha\Delta T} + 2\alpha\Delta T + \alpha^2\Delta T^2]; \\ V_{13} &= \frac{2\alpha R_\eta}{2\alpha^3} [1 - e^{-2\alpha\Delta T} + 2\alpha\Delta T e^{-\alpha\Delta T}]; \\ V_{22} &= \frac{2\alpha R_\eta}{2\alpha^3} [4e^{-\alpha\Delta T} - 3 - e^{-2\alpha\Delta T} + 2\alpha\Delta T]; \\ V_{23} &= \frac{2\alpha R_\eta}{2\alpha^2} [e^{-2\alpha\Delta T} + 1 - e^{-\alpha\Delta T}]; \\ V_{33} &= \frac{2\alpha R_\eta}{2\alpha} [1 - e^{-2\alpha\Delta T}]; \\ V_{21} = V_{31} = V_{33} &= 0. \end{aligned} \quad (17)$$

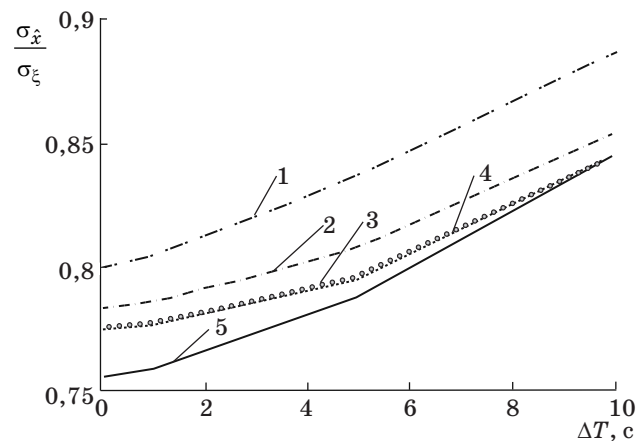
Таким образом, разработанный алгоритм отличается от известных новой динамической моделью движения в дискретном времени. В результате размерность нового алгоритма оценивания параметров движения (11) в сравнении с моделью ускорения экспоненциальной автокорреляции (14) [12, 14] снижается, что обеспечивает уменьшение вычислительной сложности. Это актуально при сопровождении групповых целей в бортовых радиолокационных станциях летательных аппаратов.

Результаты математического моделирования усреднены по 100 вычислительным экспериментам и представлены на рисунке, где 1–4 — кривые изменения отношения среднев квадратического отклонения оценки к среднев квадратическому отклонению шума для фильтра Калмана [11] соответственно с постоянной времени ускорения 10; 1; 0,1; 0,01; 5 — кривая изменения отношения среднев квадратического отклонения оценки к среднев квадратическому отклонению шума для нового алгоритма оценивания.

Итоги математического моделирования позволяют утверждать, что новый алгоритм оценивания параметров движения (11) с уменьшением объема вычислительных затрат обеспечивает рост точности сопровождения маневрирующих летательных аппаратов с увеличением частоты поступления измерительной информации в сравнении с традиционным решением.

Заключение

На основе объединенного принципа максимума разработан новый метод адаптации дискретных алгоритмов оценки параметров движения к неопределенности вида маневра летательных аппаратов. Эффект адаптации к наблюдаемому движению получен в результате применения



■ Зависимость точности оценивания от интервала дискретизации

новой динамической модели движения в дискретном времени, которая отличается от известных структурой матриц состояний и возмущений. Границы ее адекватности определяются рамками справедливости вариационного принципа Гамильтона — Остроградского [16].

Литература

1. Костоготов А. А., Костоготов А. И., Лазаренко С. В. Объединенный принцип максимума в задачах оценки параметров движения маневрирующего летательного аппарата // Радиотехника и электроника. 2009. № 4. С. 450–457.
2. Костоготов А. А., Костоготов А. И., Лазаренко С. В. Объединенный принцип максимума в информационных технологиях анализа и синтеза. — Ростов н/Д: РТИСТ (фил.) ГОУ ВПО «ЮРГУЭС», 2010. — 164 с.
3. Костоготов А. А. и др. Синтез алгоритма автономного управления математическим маятником на основе объединенного принципа максимума / А. А. Костоготов, А. А. Кузнецов, С. В. Лазаренко, Д. С. Андрашитов, И. В. Дерябкин // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Сер. Технические науки. 2010. № 3. С. 9–14.
4. Костоготов А. А. и др. Синтез оптимального управления на основе объединенного принципа максимума / А. А. Костоготов, А. И. Костоготов, С. В. Лазаренко, Л. А. Шевцова // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Сер. Технические науки. 2010. № 2. С. 31–37.
5. Костоготов А. А. и др. Метод оценки параметров движения управляемого летательного аппарата на основе объединенного принципа максимума с построением опорной траектории / А. А. Костоготов, А. И. Костоготов, С. В. Лазаренко, Б. М. Ценных // Успехи современной радиоэлектроники. 2012. № 6. С. 61–66.
6. Костоготов А. А. и др. Синтез фильтра сопровождения со структурной адаптацией на основе объединенного принципа максимума / А. А. Костоготов, А. А. Кузнецов, С. В. Лазаренко, В. А. Лосев // Информационно-управляющие системы. 2015. № 4. С. 2–9. doi:10.15217/issn1684-8853.2015.4.2
7. Костоготов А. А. и др. Совмещенный синтез адаптивного к маневру фильтра сопровождения / А. А. Костоготов, А. А. Кузнецов, С. В. Лазаренко, Б. М. Ценных // Радиотехника. 2015. № 7. С. 95–103.
8. Толпегин И. А. Применение метода минимаксной фильтрации для оценки параметров движения беспилотного летательного аппарата с использованием нелинейной модели движения // Изв. Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2014. № 2. С. 51–60.
9. Васильев К. К., Павлыгин Э. Д., Гуторов А. С. Построение траекторий маневрирующих целей на основе сплайнов и фильтра Калмана // Автоматизация процессов управления. 2016. № 1. С. 67–75.
10. Bar-Shalom Y., Rong Li X., Kirubarajan T. Estimation with Applications to Tracking and Navigation. — N. Y.: John Wiley & Sons, 2001. — 558 p.
11. Бар-Шалом Я. Траекторная обработка. Принципы, способы и алгоритмы. Ч. 2. — М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. — 239 с.
12. Singer R. A. Estimating Optimal Tracking Filter Performance for Manned Maneuvering Targets // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 1970. AES-6. N 4. P. 473–483.
13. Li X. R., Jilkov V. P. Survey of Maneuvering Target Tracking. Part I: Dynamic Models // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2003. Vol. 39. N 4. P. 1333–1364. doi:10.1109/TAES.2003.1261132
14. Moshiri B., Besharati F. Maneuvering Target Tracking // WSEAS Transactions on Circuit and Systems. 2004. Vol. 3. P. 176–182.
15. Jin-Long Y., Hong-Bing J. A Novel Robust Two-Stage Extended Kalman Filter for Bearings-Only Maneuvering Target Tracking // International Journal of the Physical Sciences. 2011. Vol. 6(5) P. 987–991. doi:10.5897/IJPS11.037
16. Лурье А. И. Аналитическая механика. — М.: ГИФМЛ, 1961. — 824 с.
17. Костоготов А. А., Лазаренко С. В., Мурашев А. А. Метод структурно-параметрической идентификации инерциальных навигационных систем с использованием вариационных принципов // Оборонная техника. 2014. № 5–6. С. 43–49.
18. Костоготов А. А. и др. Структурный синтез лагранжевых систем автоматического управления с использованием первых интегралов движения / А. А. Костоготов, А. А. Кузнецов, С. В. Лазаренко, Д. С. Андрашитов // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2015. № 12. С. 12–18.
19. Седж Э. П., Мелса Д. Л. Идентификация систем управления. — М.: Гл. ред. физ.-мат. лит., 1974. — 248 с.
20. Гантмахер Ф. Р. Теория матриц. — М.: Физматлит, 2010. — 560 с.

UDC 62-50

doi:10.15217/issn1684-8853.2016.6.10

Structural Adaptation of Discrete Algorithms of Combined-Maximum Principle in Assessment of Movement ParametersKostoglotov A. A.^a, Dr. Sc., Tech., Professor, kostglogotov@me.comKuznetsov A. A.^b, PhD, Tech., Associate Professor, smithaa@yandex.ruLazarenko S. V.^c, PhD, Tech., rh3311@mail.ruDerabkin I. V.^a, PhD, Tech., i.deryabkin@jint.biz^aRostov State Transport University, 1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344000, Russian Federation^bProfessor N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin Military Air Academy, 54A, Staryh Bolshevikov St., 394064, Voronezh, Russian Federation^cDon State Technical University, 1, Gagarin Sq., 344010, Rostov-on-Don, Russian Federation

Introduction: When a movement model disagrees with the observed state changes, the estimation algorithm which follows the moving target can diverge or even fail; this is why developing adaptive filters is so important. One of the conventional ways to adapt filters is using a set of identical models with various parameters. This allows you to take into account the kinematic model uncertainties of statistical or geometrical nature when you describe the movement. However, the vast variety of movement types makes the solutions for filters built using this approach too sophisticated. **Purpose:** We have to solve the problem of adapting a discrete mathematical model to the dynamics of an observed system as a result of structural synthesis obtained from solving the return problem of dynamics on the basis of the combined-maximum principle. **Results:** A dynamic model of the system movement has been developed in the form of a vector differential equation. It differs from the other known models by its structure and the dimension of its matrices of states and excitations due to the use of an acceleration model obtained via Hamilton – Ostrogradsky variation principle. The discrete method of invariant immersion allows you to develop a new algorithm of estimating the parameters of a moving target. Mathematical modeling has shown that compared to the traditional acceleration model with exponential autocorrelation, the new solution provides an increase in the estimation accuracy with less computational expenses. **Practical relevance:** The developed method of estimation algorithm structure adaptation leads to a higher estimation accuracy and lower computational expenses as compared to the conventional methods.

Keywords — Vector of Excitations, Discrete-Time Movement Model, State-Transition Matrix, Integrated Maximum Principle, Invariant Immersion, Kalman's Filter.

References

1. Kostoglotov A. A., Kostoglotov A. I., Lazarenko S. V. The Combined-Maximum Principle in Problems of Estimating the Motion Parameters of a Maneuvering Aircraft. *Radiotekhnika i elektronika*, 2009, no. 4, pp. 450–457 (In Russian).
2. Kostoglotov A. A., Kostoglotov A. I., Lazarenko S. V. *Ob'edinennyi printsip maksimuma v informatsionnykh tekhnologiiakh analiza i sinteza* [The Combined-Maximum Principle of a Maximum in Information Technologies of the Analysis and Synthesis]. Rostov-on-Don, RTIST (fil.) GOU VPO “IuRGUES”, 2010. 154 p. (In Russian).
3. Andrashitov D. S., Kostoglotov A. A., Kuznetsov A. A., Derabkin I. V., Lazarenko S. V. Synthesis Algorithm Autonomous Control Pendulum on the Basis of the Combined-Maximum Principle. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Severo-Kavkazskii region. Ser. Tekhnicheskie nauki*, 2010, no. 3, pp. 9–14 (In Russian).
4. Kostoglotov A. A., Kostoglotov A. I., Lazarenko S. V., Shevcova L. A. Synthesis of Optimum Control on the Basis of the Combined-Maximum Principle. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Severo-Kavkazskii region. Ser. Tekhnicheskie nauki*, 2010, no. 2, pp. 31–37 (In Russian).
5. Kostoglotov A. A., Kostoglotov A. I., Lazarenko S. V., Tsenin B. M. Method of an Estimation of Parameters of Movement of the Operated Flying Machine on the Basis of an Combined-Maximum Principle with Construction of a Basic Trajectory. *Uspekhi sovremennoi radioelektroniki*, 2012, no. 6, pp. 61–66 (In Russian).
6. Kostoglotov A. A., Kuznetsov A. A., Lazarenko S. V., Losev V. A. Synthesis of the Filter of Maintenance with Structural Adaptation on the Basis of the Combined-Maximum Principle. *Informacionno-upravlyayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2015, no. 4, pp. 2–9 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2015.4.2
7. Kostoglotov A. A., Kuznetsov A. A., Lazarenko S. V., Tsenin B. M. The Combined Synthesis of the Maintenance Filter, Adaptive to Maneuver. *Radiotekhnika*, 2015, no. 7, pp. 95–103 (In Russian).
8. Tolpegin I. A. Application of a Method of a Minimax Filtration for an Assessment of Parameters of Driving of the Unmanned Aerial Vehicle with use of Non-linear Model of Driving. *Izvestiia Rossiiskoi akademii raketnykh i artileriskikh nauk*, 2014, no. 2, pp. 51–60 (In Russian).
9. Vasil'ev K. K., Pavlygin Eh. D., Gutorov A. S. Creation of Trajectories of the Maneuvering Purposes on the Basis of Splines and a Kalman Filter. *Avtomatizatsiia protsessov upravleniia*, 2016, no. 1, pp. 67–75 (In Russian).
10. Bar-Shalom Y., Rong Li X., Kirubarajan T. *Estimation with Applications to Tracking and Navigation*. New York, John Wiley & Sons, 2001. 558 p.
11. Bar-Shalom Y. *Traektornaiia obrabotka. Printsipy, sposoby i algoritmy* [Trajectory Processing. Principles, Ways and Algorithms]. Moscow, MGTU im. N. Eh. Bauman Publ., 2011. 239 p. (In Russian).
12. Singer R. A. Estimating Optimal Tracking Filter Performance for Manned Maneuvering Targets. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1970, AES-6, no. 4, pp. 473–483.
13. Li X. R., Jilkov V. P. Survey of Maneuvering Target Tracking. Part I. Dynamic Models. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2003, vol. 39, no. 4, pp. 1333–1364. doi:10.1109/TAES.2003.1261132
14. Moshiri B., Besharati F. Maneuvering Target Tracking. *WSEAS Transactions on Circuit and Systems*, 2004, vol. 3, pp. 176–182.
15. Jin-Long Y., Hong-Bing J. A Novel Robust Two-Stage Extended Kalman Filter for Bearings-Only Maneuvering Target Tracking. *International Journal of the Physical Sciences*, 2011, vol. 6 (5), pp. 987–991. doi:10.5897/IJPS11.037
16. Lur'e A. I. *Analiticheskaya mekhanika* [Analytical Mechanics]. Moscow, GIFML Publ., 1961. 824 p. (In Russian).
17. Kostoglotov A. A., Lazarenko S. V., Murashev A. A. Method of Structural and Parametrical Identification of Inertial Navigation Systems with use of the Variation Principles. *Oboronnaya tekhnika*, 2014, no. 5–6, pp. 43–49 (In Russian).
18. Andrashitov D. S., Kostoglotov A. A., Kuznetsov A. A., Lazarenko S. V. Structural Synthesis of Lagrangian Systems of Automatic Control with use of the First Integrals of Driving. *Informatsionno-izmeritel'nye i upravliayushchie sistemy*, 2015, no. 12, pp. 12–18 (In Russian).
19. Sage A. P., Melsa J. L. *System Identification*. New York and London, Academic Press, 1971. 221 p.
20. Gantmaher F. R. *Teoriia matrits* [Theory of Matrixes]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2010. 560 p. (In Russian).

МЕТОДОЛОГИЯ ПОСТРОЕНИЯ ПРОАКТИВНЫХ РЕКОМЕНДУЮЩИХ СИСТЕМ ДЛЯ ИНФОМОБИЛЬНЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ

Н. Г. Шилов^а, канд. техн. наук, старший научный сотрудник

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

Постановка проблемы: с развитием персональных мобильных устройств пользователи получают доступ к различной информации практически в любое время и в любом месте. Однако традиционные способы не позволяют осуществлять эффективную поддержку принятия решений в случаях постоянно изменяющейся ситуации и в отсутствие у пользователя возможности достаточно интенсивно взаимодействовать с устройством, предоставляющим информацию (например, при вождении автомобиля или во время ходьбы). **Цель:** разработка теоретических и технологических основ проактивных рекомендуемых систем для создания инфомобильных приложений, способных оказывать персонализированную мобильную контекстно зависимую интеллектуальную поддержку принятия решений пользователям, на основе анализа не только текущей ситуации, но и предполагаемого ее развития. **Результаты:** проанализированы исследования в области проактивных рекомендуемых систем и в смежных областях (персонализации, контекстно зависимой поддержки принятия решений, информационной поддержки туристов). На основе данного анализа и анализа сценариев использования инфомобильных приложений специфицированы следующие требования к ним: распределенная архитектура, наличие средств обеспечения технической и семантической интероперабельности, контекстная зависимость и персонализированность, использование мобильных устройств для взаимодействия с пользователем, проактивность, использование концепции рекомендуемых систем. Сформулированы основные принципы методологии построения проактивных рекомендуемых систем для инфомобильных приложений: наличие общей онтологии проблемной области; описание контекста в формализме и терминологии общей онтологии; использование сервис-ориентированной архитектуры и стандартов интернет-сервисов; использование методов управления контекстом, профилирования, проактивного предоставления рекомендаций. Разработана сервис-ориентированная архитектура систем рассматриваемого класса. **Практическая значимость:** предложенные методология и сервис-ориентированная архитектура могут быть использованы при создании инфомобильных приложений.

Ключевые слова — инфомобильность, рекомендуемая система, требования, методология, сервис-ориентированная архитектура.

Введение

Создание проактивных рекомендуемых систем, позволяющих формировать рекомендации с ориентацией на текущие и прогнозируемые потребности и предпочтения (как явные, так и неявные) пользователя, — это новый качественный уровень интеллектуальной поддержки принятия решений.

Инфомобильность (infomobility) [1] подразумевает организацию сервисов для предоставления мультимодальной динамической информации пользователям как до поездки, так и во время нее. С появлением персональных мобильных устройств, с помощью которых пользователь может получать мультимодальную информацию в любой момент времени, данное направление исследований вызвало повышенный интерес. Инфомобильность играет важную роль в развитии эффективных транспортных систем, а также в улучшении качества обслуживания их пользователей. Согласно прогнозу McKinsey Global Institute [2], рынок таких информационных технологий, как мобильный Интернет, автоматизированная обработка знаний и Internet of Things к 2025 г. в сумме может превысить 20 трлн долл.

На основе анализа состояния исследований в рассматриваемой и смежных областях и анализа сценариев использования инфомобильных приложений автором определены требования к ним, сформулированы основные принципы методологии построения проактивных рекомендуемых систем для инфомобильных приложений и предложена их сервис-ориентированная архитектура.

Сценарии использования инфомобильных приложений и их специфика

Предложены следующие два возможных сценария использования системы.

Первый сценарий подразумевает информационную поддержку пользователя, для достижения заданной точки использующего общественный транспорт. Инфомобильное приложение загружено в смартфон. Согласно сценарию, после выбора конечной точки приложение анализирует доступные маршруты общественного транспорта и предлагает пользователю различные способы передвижения. При этом учитываются предпочтения пользователя (ограничение на передвижение пешком, преимущественные виды общественного транспорта, приоритеты по стоимости проезда

и времени поездки). В процессе формирования допустимых решений система должна учитывать настоящую обстановку и ее развитие, например погодные условия (даже если пользователь предпочитает перемещение пешком, во время дождя такой способ передвижения нежелателен), текущую ситуацию с общественным транспортом (при задержке одного из видов общественного транспорта система должна перестроить маршрут «на лету» так, чтобы пользователь прибыл в пункт назначения вовремя) и т. п.

Второй сценарий направлен на информационную поддержку пользователя, совершающего поездку на автомобиле. В данном случае необходимо не только учитывать дорожную ситуацию (например, наличие или прогнозируемое появление заторов), но и текущее состояние автомобиля (например, необходимость заправки) и пользователя (например, при длительной поездке система должна найти место отдыха, чтобы водитель мог отдохнуть и поесть). Кроме того, при поиске заправок, мест отдыха и т. п. необходимо учитывать предпочтения пользователя (т. е. предлагать автозаправочные станции, рестораны или кафе определенных сетей и т. п.). Поскольку при дальних поездках водитель зачастую может оказаться там, где он раньше не был, и предпочтений, соответствующих конкретной ситуации, может не быть, предполагается использовать методы коллаборативной фильтрации [3] для обобщения предпочтений пользователей со схожими предпочтениями.

Очевидно, что в инфомобильных приложениях одним из существенных ограничений является то, что пользователь должен иметь возможность взаимодействия с приложением «на ходу», при этом способы взаимодействия существенно ограничены (невозможность ввода текстового запроса, просмотра и анализа значительного объема предоставляемой информации и т. п.). Таким образом, для решения данной проблемы предлагается в качестве основы инфомобильных приложений использовать концепцию проактивных рекомендующих систем. С одной стороны, проактивность позволит избежать необходимости вводить информацию во время движения (система сама может анализировать текущую ситуацию за счет использования либо различных датчиков персонального мобильного устройства (например, акселерометра и GPS/ГЛОНАСС), либо информационной системы транспортного средства (предоставляющей сведения о скорости, текущем местоположении, остатке топлива и т. п.)), а с другой стороны, система на основе анализа текущей ситуации и ее вероятного развития сама может предвосхищать вероятные ситуации, требующие информационной поддержки, и осуществлять такую поддержку проактивно (без запроса пользователя).

Использование концепции рекомендующих систем позволит избавлять пользователя от необходимости изучения больших объемов информации и предоставлять ему ранжированный согласно некоторому критерию (например, полезности) небольшой список альтернативных решений. Очевидно, что эффективная работа такой системы возможна, только если она является персонализированной и контекстно зависимой.

Обзор состояния исследований

Рекомендующие системы — это разновидности систем поддержки принятия решений, осуществляющих сужение и ранжирование множества представляемых пользователю альтернатив путем оценки предполагаемой их полезности. Информация, на основе которой происходит оценка предполагаемой полезности, определяет класс рекомендующей системы и может включать в себя анкетные данные пользователя, историю предыдущих решений, характеристики альтернатив, параметры текущей ситуации, решающие правила и др.

В последнее время интерес к созданию рекомендующих систем значительно возрос, однако современные рекомендующие системы в большинстве своем работают по принципу «вопрос — ответ». Активной стороной во взаимодействии с рекомендующей системой выступает пользователь, посылающий запрос, возможно, сообщая в нем какие-то дополнительные ограничения на интересующие варианты. В ответ рекомендующая система предлагает набор рекомендаций. На данный момент практически не существует систем, которые предлагали бы рекомендации проактивным образом, без запроса пользователя на основе анализа текущей ситуации и профиля его предпочтений. Одной из причин такого положения является то, что слишком велик риск назойливого предложения пользователю нерелевантной информации. Однако, как было указано выше, современные мобильные устройства, оснащенные разнообразными, в том числе биометрическими, сенсорами, делают проактивные рекомендации осуществимыми и удобными за счет возможности строить все более точные модели действий пользователя. Особенно актуальными проактивные рекомендации являются в мобильных туристических и транспортных приложениях по двум причинам: во-первых, в силу ярко выраженного динамического характера проблемной ситуации — пользователь все время перемещается в пространстве, изменяется транспортная обстановка, погодные условия; во-вторых, на мобильных устройствах, как правило, довольно ограничены возможности для явного ввода информации и просмотра большого числа предла-

гаемых вариантов, но богатые возможности для неявного ввода за счет разнообразных сенсоров.

Поскольку проактивные рекомендуемые системы являются новым направлением исследований, в данном разделе представлены исследования областей, методы, модели и технологии которых были использованы при разработке теоретических и технологических основ вышеуказанных систем.

В основу рассматриваемого подхода предлагается заложить механизмы проактивности. Использование элементов проактивности в информационных системах для различных областей человеческой деятельности обсуждается уже не первое десятилетие. Например, система XLibris [4] направлена на поиск дополнительных, предположительно полезных для пользователя, документов, в то время как он работает над своим документом.

Появление мобильных устройств вызвало более интенсивное развитие проактивных систем. Наиболее популярной является идея предоставления информации, если пользователь находится в определенном месте или рядом с ним. Например, CyberMinder [5] показывает предварительно заданные пользователем напоминания, связанные с определенным местом. Использование этой идеи положило начало появлению различных автоматизированных туристических гидов.

Следующим шагом развития является появление систем, основанных на предсказании поведения пользователя (например, его будущего местоположения [6, 7] или действий [8, 9]) и распознавании ситуации [10].

Проактивная информационная поддержка пользователей, несмотря на значительную историю исследований, все еще не может предложить эффективно работающие решения в областях повседневной деятельности [11–13]. Существует ряд подходов, направленных на решение задач в достаточно узких проблемных областях, например, мониторинг навигационной обстановки [14, 15], обеспечение безопасности строго регламентированных процессов [16, 17], электронное обучение [18–20] и т. п.

Своевременное предоставление рекомендаций невозможно без учета контекста текущей ситуации. Предоставление информации пользователю в зависимости от текущей ситуации и с использованием мобильных устройств (инфомобильные приложения) также рассматривается в ряде работ [21–23], однако ни одна из них не предлагает проактивного поведения применительно к инфомобильным приложениям.

Интеграция проактивных систем в автомобильные информационные системы является на сегодня практически не исследованной областью. Такие работы в основном посвящены филь-

трации отображаемых точек интереса на основе таких методов, как байесовские сети доверия; вывод, основанный на правилах; групповые рекомендации. Интеграция проактивных систем с рекомендуемыми рассматривается как весьма перспективное направление [24, 25].

Существует достаточно большое количество проектов поддержки туристов в зависимости от контекста текущей ситуации, которые можно разделить на три основные группы [26].

1. Приложения, которые выполняют поиск информации о достопримечательностях рядом с туристом (например, система Word Explorer, которая, по сути, является интерфейсом к сервису Wikipedia; система Tourist attractions, которая использует сервис Google для поиска).

2. Приложения, осуществляющие поиск по собственной базе данных (например, SmartMuseum, Triposo).

3. Приложения, которые накапливают оценки пользователей и позволяют тем самым туристу получить представление о достопримечательности (например, Foursquare, TripAdvisor).

Ни одно из существующих приложений не дает рекомендации пользователю на основе прогнозирования развития текущей ситуации и поведения пользователя, т. е. они не являются проактивными.

Технический университет в Мюнхене (Германия) в настоящее время ведет работы в области исследования теоретических аспектов использования проактивных рекомендуемых систем в автомобилях для концерна BMW. В данной работе не рассматриваются преимущества использования групповых рекомендуемых систем [27–29].

В политехническом университете Милана (Италия) проводятся исследования в области разработки интегрированной архитектуры инфомобильных систем [30]. Эта работа посвящена в большей степени технологической составляющей инфомобильных систем, без использования элементов проактивности.

Существует также и ряд других работ, более отдаленно связанных с рассматриваемой темой. Однако работ, решающих данную задачу, нами не найдено. Вышеуказанные проекты могут явиться взаимодополняющими, результаты которых в будущем могут быть объединены для решения в большей степени прикладных задач.

Спецификация требований к инфомобильным приложениям

Проведенный анализ существующих результатов исследований в области построения рекомендуемых систем показал, что персонализация уже является неотъемлемой частью современных

рекомендующих систем. За последнее время сформировалось два основных подхода к персонализированному предоставлению информации [31]: 1) персонализированное извлечение информации (изменение результатов поиска информации, как правило, посредством ранжирования найденной информации (например, документов) с помощью различных алгоритмов) и 2) адаптивное предоставление информации (изменение параметров поиска информации и ее представление на основе ряда параметров, как правило, именуемых «аспектами» или «контекстами»). В рамках инфомобильных систем предлагается использовать подходы обоих классов. С одной стороны, инфомобильные приложения (приложения, направленные на информационную поддержку пользователя как при планировании поездки, так и во время поездки, т. е. с учетом изменяющейся ситуации) должны учитывать предпочтения пользователей (очевидно, что разные пользователи могут выбрать разные способы/маршруты передвижения в точку назначения). С другой стороны, предоставление информации во время поездки может быть полезным, лишь если эта информация изменяется в зависимости от текущей ситуации, т. е. необходимо учитывать контекст текущей ситуации. Таким образом, в части персонализации предлагается гибридный подход контекстно зависимой персонализированной информационной поддержки пользователя на основе технологий профилирования и управления контекстом.

В области взаимодействия устройств и сервисов можно выделить следующие задачи, требующие решения в системах рассматриваемого класса: самоорганизация и самоадаптация устройств для решения задач пользователя, семантическая интеграция устройств, оркестрирование сервисов, создание проблемно-ориентированных систем. Поскольку информация о текущей ситуации и возможных способах перемещения (дорожной обстановке, маршрутах и т. п.) извлекается из различных независимых источников, необходимо обеспечить их интероперабельность как на техническом, так и на семантическом уровнях. Кроме того, ряд типовых задач (прокладка маршрута, расчет расхода топлива, поиск достопримечательностей или других объектов и т. п.) можно эффективно решать с помощью сторонних сервисов. Следовательно, необходимо не только обеспечить техническую и семантическую интероперабельность инфомобильных приложений с такими сервисами, но и организовать их эффективное взаимодействие в реальном времени посредством решения задач оркестрирования и самоорганизации сервисов.

Таким образом, на основе анализа существующих результатов в области построения реко-

мендующих систем, систем персонализации, использования мобильных устройств, проактивных систем, а также предложенных сценариев специфицированы следующие требования к системе для инфомобильных приложений:

- 1) система должна иметь распределенную архитектуру, основанную на использовании различных независимых информационных устройств и сервисов;
- 2) в системе должны быть предусмотрены средства обеспечения технической и семантической интероперабельности элементов системы;
- 3) система должна осуществлять контекстно зависимую персонализированную информационную поддержку пользователя;
- 4) система должна поддерживать использование мобильных устройств для взаимодействия с пользователем;
- 5) система должна быть проактивной;
- 6) система должна основываться на концепции рекомендующих систем для оказания информационной поддержки пользователя.

Методология построения проактивных рекомендующих систем для инфомобильных приложений

На основе вышеуказанных требований разработана методология построения проактивных рекомендующих систем для инфомобильных приложений (рис. 1). Базовые принципы данной методологии следующие.

1. Использование сервис-ориентированной архитектуры и стандартов интернет-сервисов для обеспечения технической интероперабельности элементов системы. Сервис-ориентированная архитектура позволяет не только реализовать рас-



■ **Рис. 1.** Концептуальная схема проактивных рекомендующих систем для инфомобильных приложений

пределенную систему, но и использовать многочисленные существующие сервисы, способные как предоставлять информацию (например, о текущей погоде и ее прогноз, состоянии дорожной сети, достопримечательностях и местах интересов и др.), так и выполнять решения типовых задач (например, расчет маршрута). Применение общепринятых стандартов интернет-сервисов (wsdl, soap и т. п.) позволяет подключать такие сервисы к системе без дополнительной разработки интерфейсных агентов (wrappers).

2. Использование общей онтологии проблемной области для обеспечения семантической интероперабельности элементов системы. Онтологии хорошо зарекомендовали себя в качестве средства обеспечения семантической интероперабельности систем, состоящих из многочисленных независимых элементов. Ввиду ограниченной проблемной области инфомобильных приложений использование общей онтологии позволяет избежать неоднократных переводов информации из одной терминологии в другую, что, как правило, сопровождается потерей информации.

3. Использование методов управления контекстом для обеспечения контекстной зависимости предоставляемой информационной поддержки. Данные методы подразумевают описание текущей ситуации и (или) проблемы при помощи контекста, который, с одной стороны, содержит всю информацию, относящуюся к данной ситуации/проблеме (что позволяет не упустить какие-либо факторы, влияющие на возможные решения), а с другой стороны, не содержит информацию, не относящуюся к ней (что позволяет снизить размерность задачи за счет отсека нерелевантной информации). Технологии управления контекстом также включают управление версиями контекста (context versioning), интеллектуального анализа контекста (context mining) и др., которые помогут существенно повысить эффективность работы с контекстом.

4. Описание контекста в формализме и терминологии общей онтологии. При наличии общей онтологии проблемной области целесообразно использовать ее формализм и терминологию для описания контекста, что, как было показано ранее, позволяет избежать неоднократных переводов информации из одной терминологии в другую, как правило, сопровождающихся потерей информации.

5. Использование методов профилирования для описания предпочтений пользователя. Персонализированные системы основаны на моделировании пользователя при помощи описания его предпочтений в виде профиля пользователя. При разработке системы для инфомобильных приложений необходимо учитывать, что профили пользователей должны быть динамичными, т. е.

они должны позволять осуществлять обновление предпочтений пользователя, причем как самим пользователем, так и автоматически, при выявлении системой неявных предпочтений на основе анализа истории принятых пользователем решений, а также контекстов текущих ситуаций, в которых данные решения были приняты.

6. Использование методов проактивной информационной поддержки. Как уже указывалось, проактивное поведение системы позволит избежать необходимости ввода информации во время движения за счет способности предвосхищать вероятное развитие текущей ситуации, возникновение задач, требующих информационной поддержки, и осуществлять необходимую поддержку проактивно (без запроса пользователя).

7. Использование методов предоставления рекомендаций, объединяющих персонализированное извлечение информации и адаптивное предоставление информации. Такой способ предоставления информационной поддержки (в виде ранжированного по степени предполагаемой полезности пользователю решений) является наиболее удобным в ситуациях, когда пользователь не имеет возможности детально изучать информацию, влияющую на принимаемое решение.

Сервис-ориентированная архитектура проактивных рекомендуемых систем для инфомобильных приложений

Предложенная сервис-ориентированная архитектура системы (рис. 2) подразумевает наличие служебных сервисов, направленных на решение специфических задач, возникающих при работе системы (эти сервисы описаны ниже), а также сторонних сервисов, предоставляющих различную информацию и способных решать типовые задачи.

Как отмечалось, в инфомобильных приложениях взаимодействие с пользователем (предоставление рекомендаций и ввод явных предпочтений) осуществляется через персональное мобильное устройство (планшет, смартфон, инфомобильную систему автомобиля и т. п.), на котором работает сервис взаимодействия с пользователем или его клиентская часть в случае его распределенной реализации. При этом система должна накапливать информацию о действиях пользователя в целях выявления его неявных предпочтений с учетом ситуации, в которой эти действия были предприняты (сервис анализа решений пользователя) и хранить ее в профиле пользователя (сервис управления профилем пользователя) для последующего учета при формировании рекомендаций рекомендуемым сервисом.

Для учета текущей ситуации используется сервис управления контекстом. Контекст описы-



■ **Рис. 2.** Сервис-ориентированная архитектура проактивных рекомендующих систем для инфомобильных приложений

вается в терминах словаря и формализме общей онтологии, а информация о текущей ситуации собирается с персонального мобильного устройства пользователя и сторонних («облачных») сервисов, предоставляющих соответствующую информацию (например, о погоде). Данная информация обрабатывается сервисом анализа развития текущей ситуации и формализуется в виде контекста. Анализ развития текущей ситуации позволяет формировать рекомендации проактивно, т. е. предвосхищая возможные потребности и действия пользователя.

Поскольку сторонние («облачные») сервисы, предоставляющие как информацию, так и методы решения типовых задач (например, прокладки маршрута), оперируют в своей терминологии, а не терминологии общей онтологии системы, необходимо установить соответствия между последними. Данная функциональность заложена в сервисе установки семантических соответствий.

Заключение

В статье предложена методология создания контекстно зависимых рекомендующих систем для инфомобильных приложений. Данная методология базируется на методах контекстно зависимого поиска, обработки и предоставления информации, описания предпочтения пользователей с помощью динамических профилей, онтолого-ориентированного описания проблемной области, контекста текущей ситуации и профилей пользователей. Объединение подходов персонализированного извлечения информации и адаптивное предоставление информации позволяет обеспечить динамическую информационную поддержку пользователей с учетом их предпочтений и потребностей. Описание всех элементов системы (источников информации, вспомогательных сервисов, контекста, профиля пользователя) с помощью формализма и терминологии единой общей онтологии позволяет избавиться от необходимости перевода информации из одной терминологии в другую и предотвратить возможные потери, связанные с таким переводом. Динамическое профилирование пользователей с учетом неявных предпочтений, выявляемых системой на основе анализа истории взаимодействия, существенно повышает качество предлагаемых системой рекомендаций.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 15-07-08092 и 15-07-08391), Президиума РАН (программа III.3, проект № 213) и бюджетных тем № 0073-2014-0005, 0073-2015-0006 и 0073-2015-0007.

Литература

1. Moraitis P., Petraki E., Spanoudakis N. I. Providing Advanced, Personalised Infomobility Services Using Agent Technology// Applications and Innovations in Intelligent Systems XI. Springer, 2004. P. 35–48.
2. Manyika J., et al. Disruptive Technologies: Advances that will Transform Life, Business, and the Global Economy: Executive Summary/ J. Manyika, M. Chui, J. Bughin, R. Dobbs, P. Bisson, A. Marrs. — McKinsey Global Institute, 2013. — 22 p.
3. Ekstrand M. D., Riedl J. T., Konstan J. A. Collaborative Filtering Recommender Systems // Foundations

- and Trends in Human-Computer Interaction. 2011. N 4(2). P. 81–173.
4. Price M., Golovchinsky G., Schilit B. N. Linking by Inking: Trailblazing in a Paper-Like Hypertext// Conference on Hypertext and Hypermedia, Pittsburgh, PA, USA, Jun. 20–24, 1998. P. 30–39.
5. Dey A. K., Abowd G. D. CyberMinder: a Context-Aware System for Supporting Reminders// Symp. on Handheld and Ubiquitous Computing, Bristol, UK, Sept. 25–27, 2000. P. 172–186.
6. Hinze A., Sachs K., Buchmann A. Event-Based Applications and Enabling Technologies// Conf. on Distributed Event- Based Systems, Nashville, TN,

- USA, Jul. 6–9, 2009. <https://www.dvs.tu-darmstadt.de/publications/pdf/EBA-keynoteBuchmann04.pdf> (дата обращения: 31.10.2016).
7. **Lee G.** An Automatic Personalized Context-Aware Event Notification System for Mobile Users. 2010. <http://www.docfoc.com/622015-1-an-automatic-personalized-context-aware-event-notification-system> (дата обращения: 31.10.2016).
 8. **Bellotti V.**, et al. Activity-Based Serendipitous Recommendations with the Magitti Mobile Leisure Guide/ V. Bellotti, B. Price, P. Rasmussen, M. Roberts, D. J. Schiano, A. Walendowski, B. Begole, E. H. Chi, N. Ducheneaut, J. Fang, E. Isaacs, T. King, M. W. Newman, K. Partridge // Conf. on Human Factors in Computing Systems, Florence, Italy, Apr. 5–10, 2008. P. 1157–1166.
 9. **Partridge K., Price B.** Enhancing Mobile Recommender Systems with Activity Inference// Conf. on User Modeling, Adaptation, and Personalization, Trento, Italy, Jun. 22–26, 2009. P. 307–318.
 10. **Ciaramella A.**, et al. Combining Fuzzy Logic and Semantic Web to Enable Situation-Awareness in Service Recommendation/ A. Ciaramella, M. G. C. A. Ciminno, F. Marcelloni, U. Straccia // Conf. on Database and Expert Systems Applications, Bilbao, Spain, Aug. 30–Sept. 3, 2010. P. 31–45.
 11. **Kaufman R., Bowers D.** Proactive and Reactive Planners: An Even Closer Look at Needs Assessment and Needs Analysis // Performance + Instruction. 1990. N 29(5). P. 7–10.
 12. **Hummel J. W., Stenger A. J.** An Evaluation of Proactive vs. Reactive Replenishment Systems // Intern. Journal of Physical Distribution & Materials Management. 1988. N 18(4). P. 3–13.
 13. Пат. 4130881 США, System and Technique for Automated Medical History Taking/ Haessler H. A., Elshtain E. L., Holland T. 1978.
 14. **Mishra M.**, et al. Dynamic Resource Management and Information Integration for Proactive Decision Support and Planning/ M. Mishra, D. Sidoti, D. F. M. Ayala, X. Han, G. V. Avvari, L. Zhang, K. R. Pattipati, W. An, J. A. Hansen, D. L. Kleinman // IEEE 18th Intern. Conf. on Information Fusion, Washington, DC, USA, Jul. 06–09, 2015. P. 295–302.
 15. **Moroni D.**, et al. A Proactive System for Maritime Environment Monitoring/ D. Moroni, G. Pieri, M. Tampucci, O. Salvetti // Marine Pollution Bulletin. 2015. N 102(2). P. 316–322.
 16. **Fyhr A., Ternov S., Ek Å.** From a Reactive to a Proactive Safety Approach. Analysis of Medication Errors in Chemotherapy Using General Failure Types // European Journal of Cancer Care. 2015. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/ecc.12348/pdf> (дата обращения: 31.10.2016).
 17. **Forsythe P.** Proactive Construction Safety Systems and the Human Factor // Proc. of the ICE-Management, Procurement and Law. 2014. N 167(5). P. 242–252.
 18. **Gallego D.**, et al. Enhanced Recommendations for e-Learning Authoring Tools Based on a Proactive Context-Aware Recommender/ D. Gallego, E. Barra, A. Gordillo, G. Huecas // IEEE Frontiers in Education Conf., Oklahoma City, OK, USA, Oct. 23–26, 2013. P. 1393–1395.
 19. **Shirnin D., Reis S., Zampunieris D.** Experimentation of Proactive Computing in Context Aware Systems: Case Study of Human-Computer Interactions in e-Learning Environment// IEEE Intern. Multi-Disciplinary Conf. on Cognitive Methods in Situation Awareness and Decision Support (CogSIMA), San Diego, CA, USA, Feb. 25–28, 2013. P. 269–276.
 20. **Shirnin D., Reis S., Zampunieris D.** Design of Proactive Scenarios and Rules for Enhanced e-Learning// Intern. Conf. on Computer Supported Education, Porto, Portugal, Apr. 16–18, 2012. P. 253–258.
 21. **da Silvia R. A. N., da Silva Costa M., Macedo M. H.** Multiple Views of Sustainable Urban Mobility: the Case of Brazil // Transport Policy. 2008. Vol. 15. P. 350–360.
 22. **Guohua Z., Ming L., Jingxia W.** Application of the Advanced Public Transport System in Cities of China and the Prospect of Its Future Development // Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology. 2007. N 7(5). P. 24–30.
 23. **Sterle C.** Location-Routing Models and Methods for Freight Distribution and Infomobility in City Logistics: PhD Thesis. — Universita degli Studi di Napoli Federico II, 2009. — 212 p.
 24. **Worndl W., Brocco M., Eigner R.** A Context-Aware Gas Station Recommender System for Vehicular Ad-Hoc Networks// Conf. on Wireless Applications and Computing, Amsterdam, Netherlands, Jul. 22–24, 2008. P. 101–108.
 25. **Turlier S., Hahn C., Gebhardt S.** Browsing Online Music Catalogs in a Vehicle// Workshop on Mobile Cloud Media Computing, Firenze, Italy, Oct. 25–29, 2010. P. 53–58.
 26. **Smirnov A.**, et al. Mobile Application for Guiding Tourist Activities: Tourist Assistant – TAIS / A. Smirnov, A. Kashevnik, N. Shilov, N. Teslya, A. Shabaev // Proc. of the 16th Conf. of Open Innovations Association FRUCT, Oulu, Finland, Oct. 27–31, 2014. P. 94–100.
 27. **Bader R.**, et al. Explanations in Proactive Recommender Systems in Automotive Scenarios/ R. Bader, A. Karitnig, W. Worndl, G. Leitner // Workshop on Decision Making and Recommendation Acceptance Issues in Recommender Systems, Girona, Spain, Jul. 11–15, 2011. http://ceur-ws.org/Vol-740/DEMRA2011_paper2.pdf (дата обращения: 31.10.2016).
 28. **Bader R.**, et al. Context-Aware POI Recommendations in an Automotive Scenario Using Multi-Criteria Decision Making Methods/ R. Bader, E. Neufeld, W. Worndl, V. Prinz // Workshop on Context-awareness in Retrieval and Recommendation, Palo Alto, CA, Feb. 13–16, 2011. P. 23–30.

29. Gallego-Vico D., Worndl W., Bader R. A Study on Proactive Delivery of Restaurant Recommendations for Android Smartphones// ACM Workshop on Personalization in Mobile Applications, Chicago, IL, Oct. 23–27, 2011. http://pema2011.cs.ucl.ac.uk/papers/pema2011_vico.pdf (дата обращения: 31.10.2016).
30. Arena M., Azzone G., Malpezzi S. Review on the Infomobility Quality — a New Framework //

IET Intelligent Transport Systems. 2015. N 9(9). P. 881–886.

31. Steichen B., Ashman H., Wade V. A Comparative Survey of Personalised Information Retrieval and Adaptive Hypermedia Techniques // Information Processing & Management. 2012. N 48(4). P. 698–724.

UDC 004.8

doi:10.15217/issn1684-8853.2016.6.16

Methodology of Developing Proactive Recommender Systems for Infomobile Applications

Shilov N. G.^a, PhD, Tech., Senior Researcher, nick@iias.spb.su

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

Introduction: Development of personal mobile devices makes it possible for the users to access various information anywhere and at any time. However, traditional methods do not provide efficient decision support when the situation is continuously changing and the intensive interaction of the user with the device is not possible (e.g., when driving or walking). **Purpose:** We develop theoretical and technological foundations of proactive recommender systems for infomobile applications capable of providing personalized context-aware intelligent decision support for the users, taking into account not only the current situation but also its possible development. **Results:** The state of the art in the area of proactive recommender systems and related areas (personalization, context-aware decision support, tourist information support) has been analyzed. On the base of this analysis and scenarios of infomobile application usage, the following requirements to such applications have been specified: distributed architecture, availability of technical and semantic interoperability support means, context awareness, personalization, usage of mobile devices to interact with the user, proactiveness, and the usage of the recommender system concept. The major principles of the methodology have been formulated: availability of a common ontology; context specification by means of formalism and terminology of the common ontology; usage of service-oriented architecture and Web-service standards, as well as usage of methods of context management, profiling and proactive generation of recommendations. A service-oriented architecture for the systems of the considered class has been proposed. **Practical relevance:** The proposed methodology and service-oriented architecture can be used for the creation of infomobile applications.

Keywords — Infomobility, Recommender System, Requirements, Methodology, Service-Oriented Architecture.

References

- Moraitis P., Petraki E., Spanoudakis N. I. Providing Advanced, Personalised Infomobility Services Using Agent Technology. *Applications and Innovations in Intelligent Systems XI*. Springer, 2004, pp. 35–48.
- Manyika J., Chui M., Bughin J., Dobbs R., Bisson P., Marrs A. *Disruptive Technologies: Advances that will Transform Life, Business, and the Global Economy: Executive Summary*. McKinsey Global Institute, 2013. 22 p.
- Ekstrand M. D., Riedl J. T., Konstan J. A. Collaborative Filtering Recommender Systems. *Foundations and Trends in Human-Computer Interaction*, 2011, no. 4(2), pp. 81–173.
- Price M., Golovchinsky G., Schilit B. N. Linking by Inking: Trailblazing in a Paper-Like Hypertext. *Conf. on Hypertext and Hypermedia*, Pittsburgh, PA, USA, 1998, pp. 30–39.
- Dey A. K., Abowd G. D. CyberMinder: a Context-Aware System for Supporting Reminders. *Symp. on Handheld and Ubiquitous Computing*, Bristol, UK, 2000, pp. 172–186.
- Hinze A., Sachs K., Buchmann A. Event-Based Applications and Enabling Technologies. *Conf. on Distributed Event-Based Systems*, Nashville, TN, USA, 2009. Available at: <https://www.dvs.tu-darmstadt.de/publications/pdf/EBA-keynoteBuchmann04.pdf> (accessed 31 October 2016).
- Lee G. *An Automatic Personalized Context-Aware Event Notification System for Mobile Users*. 2010. Available at: <http://www.docfoc.com/622015-1-an-automatic-personalized-context-aware-event-notification-system> (accessed 31 October 2016).
- Bellotti V., Price B., Rasmussen P., Roberts M., Schiano D. J., Walendowski A., Begole B., Chi E. H., Ducheneaut N., Fang J., Isaacs E., King T., Newman M. W., Partridge K. Activity-Based Serendipitous Recommendations with the Magitti Mobile Leisure Guide. *Conf. on Human Factors in Computing Systems*, Florence, Italy, 2008, pp. 1157–1166.
- Partridge K., Price B. Enhancing Mobile Recommender Systems with Activity Inference. *Conf. on User Modeling, Adaptation, and Personalization*, Trento, Italy, 2009, pp. 307–318.
- Ciaramella A., Cimino M. G. C. A., Marcelloni F., Straccia U. Combining Fuzzy Logic and Semantic Web to Enable Situation-Awareness in Service Recommendation. *Conf. on Database and Expert Systems Applications*, Bilbao, Spain, 2010, pp. 31–45.
- Kaufman R., Bowers D. Proactive and Reactive Planners: An Even Closer Look at Needs Assessment and Needs Analysis. *Performance + Instruction*, 1990, no. 29(5), pp. 7–10.
- Hummel J. W., Stenger A. J. An Evaluation of Proactive vs. Reactive Replenishment Systems. *International Journal of Physical Distribution & Materials Management*, 1988, no. 18(4), pp. 3–13.
- Haessler H. A., Elshstain E. L., Holland T. *System and Technique for Automated Medical History Taking*. Patent USA, no. 4130881, 1978.
- Mishra M., Sidoti D., Ayala D. F. M., Han X., Avvari G. V., Zhang L., Pattipati K. R., An W., Hansen J. A., Kleinman D. L. Dynamic Resource Management and Information Integration for Proactive Decision Support and Planning. *IEEE 18th Intern. Conf. on Information Fusion*, Washington, DC, USA, 2015, pp. 295–302.
- Moroni D., Pieri G., Tampucci M., Salvetti O. A Proactive System for Maritime Environment Monitoring. *Marine Pollution Bulletin*, 2015, no. 102(2), pp. 316–322.
- Fyhr A., Ternov S., Ek Å. From a Reactive to a Proactive Safety Approach. Analysis of Medication Errors in Chemotherapy Using General Failure Types. *European Journal of Cancer Care*, 2015. Available at: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/ecc.12348/pdf> (accessed 31 October 2016).
- Forsythe P. Proactive Construction Safety Systems and the Human Factor. *Proc. of the ICE-Management, Procurement and Law*, 2014, no. 167(5), pp. 242–252.
- Gallego D., Barra E., Gordillo A., Huecas G. Enhanced Recommendations for e-Learning Authoring Tools Based on a Proactive Context-Aware Recommender. *IEEE Frontiers in Education Conf.*, Oklahoma City, OK, USA, 2013, pp. 1393–1395.

19. Shirnin D., Reis S., Zampunieris D. Experimentation of Proactive Computing in Context Aware Systems: Case Study of Human-Computer Interactions in e-Learning Environment. *IEEE Intern. Multi-Disciplinary Conf. on Cognitive Methods in Situation Awareness and Decision Support (CogSIMA)*, San Diego, CA, USA, 2013, pp. 269–276.
20. Shirnin D., Reis S., Zampunieris D. Design of Proactive Scenarios and Rules for Enhanced e-Learning. *Intern. Conf. on Computer Supported Education*, Porto, Portugal, 2012, pp. 253–258.
21. da Silvia R. A. N., da Silva Costa M., Macedo M. H. Multiple Views of Sustainable Urban Mobility: the Case of Brazil. *Transport Policy*, 2008, vol. 15, pp. 350–360.
22. Guohua Z., Ming L., Jingxia W. Application of the Advanced Public Transport System in Cities of China and the Prospect of its Future Development. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2007, no. 7(5), pp. 24–30.
23. Sterle C. *Location-Routing Models and Methods for Freight Distribution and Infomobility in City Logistics*. PhD Thesis, Università degli Studi di Napoli Federico II, 2009. 212 p.
24. Worndl W., Brocco M., Eigner R. A Context-Aware Gas Station Recommender System for Vehicular Ad-Hoc Networks. *Conf. on Wireless Applications and Computing*, Amsterdam, Netherlands, 2008, pp. 101–108.
25. Turlier S., Hahn C., Gebhardt S. Browsing Online Music Catalogs in a Vehicle. *Workshop on Mobile Cloud Media Computing*, Firenze, Italy, 2010, pp. 53–58.
26. Smirnov A., Kashevnik A., Shilov N., Teslya N., Shabaev A. Mobile Application for Guiding Tourist Activities: Tourist Assistant – TAIS. *Proc. of the 16th Conf. of Open Innovations Association FRUCT*, Oulu, Finland, 2014, pp. 94–100.
27. Bader R., Karitnig A., Worndl W., Leitner G. Explanations in Proactive Recommender Systems in Automotive Scenarios. *Workshop on Decision Making and Recommendation Acceptance Issues in Recommender Systems*, Girona, Spain, 2011. Available at: http://ceur-ws.org/Vol-740/DEM-RA2011_paper2.pdf (accessed 31 October 2016).
28. Bader R., Neufeld E., Worndl W., Prinz V. Context-Aware POI Recommendations in an Automotive Scenario Using Multi-Criteria Decision Making Methods. *Workshop on Context-awareness in Retrieval and Recommendation*, Palo Alto, CA, 2011, pp. 23–30.
29. Gallego-Vico D., Worndl W., Bader R. A Study on Proactive Delivery of Restaurant Recommendations for Android Smartphones. *ACM Workshop on Personalization in Mobile Applications*, Chicago, IL, 2011. Available at: http://pema2011.cs.ucl.ac.uk/papers/pema2011_vico.pdf (accessed 31 October 2016).
30. Arena M., Azzone G., Malpezzi S. Review on the Infomobility Quality – a New Framework. *IET Intelligent Transport Systems*, 2015, no. 9(9), pp. 881–886.
31. Steichen B., Ashman H., Wade V. A Comparative Survey of Personalised Information Retrieval and Adaptive Hypermedia Techniques. *Information Processing & Management*, 2012, no. 48(4), pp. 698–724.

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.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН В КАНАЛЕ «ЗЕМЛЯ-АТМОСФЕРА»

В. А. Ненашев^а, ассистент

Н. Ш. Блаунштейн^б, доктор физ.-мат. наук, профессор

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

^бНегевский университет им. Бен-Гуриона, г. Беэр-Шева, Израиль

Постановка проблемы: моделирование и анализ процесса распространения радиоволн в канале «земля-атмосфера» с учетом вариаций коэффициентов рассеивания являются актуальными задачами. Интерес в данной области связан с изучением особенностей распространения радиоволн в канале «земля-атмосфера» при загоризонтной локации в сложных метеорологических и климатических условиях, где нижняя стенка представлена шероховатой земной поверхностью, а верхняя — атмосферой, турбулентной структурой. **Методы:** использованы методы анализа рассеяния электромагнитных волн от шероховатых поверхностей, от атмосферных турбулентных структур; методы моделирования процесса распространения радиоволн между двумя шероховатыми поверхностями; методы теории вероятности и математической статистики применительно к флуктуациям электромагнитных параметров канала «земля-атмосфера». **Результаты:** получены характеристики отражающих свойств шероховатой земной поверхности и атмосферы, содержащей турбулентные образования, с учетом влияния гидрометеоров на затухание сигнала при распространении в канале «земля-атмосфера». Для разработанной модели были взяты за основу следующие условия: строение атмосферы, строение гидрометеоров, турбулентность атмосферы, отражающие свойства от турбулентных неоднородностей атмосферы, учет влияния гидрометеоров на затухание и фединг сигнала. Разработан метод численного расчета характеристик электромагнитного поля при его распространении в канале «земля-атмосфера». **Практическая значимость:** представленная модель распространения радиоволн, адекватная реальному радиоканалу «земля-атмосфера», позволяет проводить компьютерные эксперименты для разработки алгоритмов передачи данных на большие расстояния, а также полунатурные эксперименты для отработки аппаратуры загоризонтной локационной техники.

Ключевые слова — математическая модель канала, загоризонтное распространение радиоволн, шероховатая поверхность, земная поверхность, атмосфера, турбулентные неоднородности.

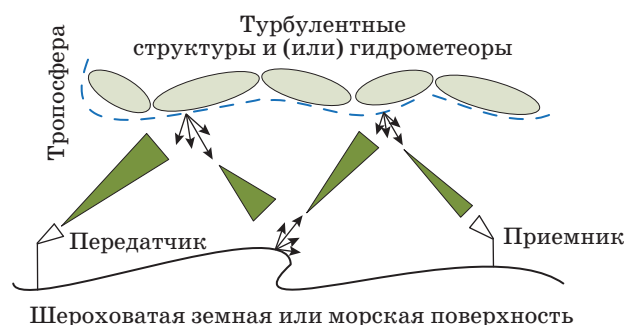
Введение

Характер рассеяния радиоволн между поверхностями «земля-атмосфера-земля» определяется многими факторами. Основными являются соотношения между размерами неровностей поверхностей волноводной структуры и длиной волны падающего излучения, кроме них существенное влияние на характеристики электромагнитного (ЭМ) поля оказывают размеры рассеивающих площадок, способы их облучения, поляризация первичной волны, отражающие и преломляющие свойства вещества и т. д. В зависимости от соотношения между указанными факторами применяют те или иные приближенные методы расчета характеристик рассеянного ЭМ-поля.

Используя теоретические модели, представленные в работах [1–4], задачу распространения радиоволн в канале «земля-атмосфера-земля» можно рассматривать как задачу распространения ЭМ-волн между двумя шероховатыми поверхностями. Верхней поверхностью является атмосфера с «шероховатостями», обусловленными гидрометеорами и турбулентными структурами. Нижняя поверхность — шероховатая земная или морская поверхность (рис. 1). Эти поверхности оказывают существенное влияние на переотра-

жения в волноводной структуре, которую в дальнейшем будем называть волноводом, состоящим из двух поверхностей, но без боковых стенок.

Отметим основные моменты, которые будут рассмотрены в данной работе. Тропосфера содержит различные виды газообразных, жидких и кристаллических структур, а также гидрометеоры (гидрометеообразования) [5], такие как аэрозоли, дождь, снег, облака и т. д. Более того, за счет нерегулярных в пространстве и спорадических во времени потоков воздуха, т. е. ветра, возникают хаотические структуры, известные



■ **Рис. 1.** Распространение радиоволн в канале «земля-атмосфера-земля»

как «атмосферные турбулентности» [6]. В дальнейшем изложении рассмотрены характеристики гидрометеоров, их влияние на распространение радиоволн, приведена стохастическая модель волновода «земля-атмосфера-земля», разработан метод численного расчета характеристик ЭМ-поля при распространении радиоволн в канале «земля-атмосфера-земля», приведены результаты численного анализа.

Отражения от гидрометеоров и турбулентных неоднородностей атмосферы

Гидрометеоры представляют собой водяные или ледяные частицы, формирующиеся в атмосфере над земной поверхностью как результат конденсации и сублимации атмосферных атомов и молекул. Наиболее распространенные гидрометеоры — это дождь, туман, снег и облака. Рассеяние и затухание гидрометеоров существенно влияет на распространение сигналов через атмосферу [1–4].

Гидрометеоры относятся к объемно-распределенным структурам. Отраженный сигнал представляет собой суперпозицию отражений от частиц, заполняющих элемент разрешения антенны РЛС, представляющий собой импульсный объем [5].

Отражения от частиц, заполняющих импульсный объем, обусловлены когерентным и некогерентным рассеянием падающей ЭМ-волны. В сантиметровом и миллиметровом диапазонах когерентным рассеянием можно пренебречь.

При прохождении сигналов через облака, дождь, снег, град, туман необходимо учитывать ослабление этих сигналов. Ослабление сигналов вызывается рассеянием энергии сигнала газами, образующими атмосферу, а также поглощением и рассеянием этой энергии частицами облаков и осадков и становится ощутимым, в частности, когда несущая частота сигнала превышает 1,3 ГГц [5].

Уменьшение мощности отраженного сигнала учитывается в расчетах путем введения в соответствующие формулы множителя ослабления $k_{осл}$. На величину $k_{осл}$ влияют расстояние от источника до приемника и свойства вещества, заполняющего ту или иную среду, в которой распространяются радиоволны. Из газов, входящих в состав земной атмосферы, наибольшее ослабление ЭМ-волн вызывают кислород и водяные пары [6].

Для турбулентных неоднородностей характерен брэгговский механизм рассеяния, при котором отражение в обратном направлении происходит на неоднородностях показателя преломления с пространственным масштабом, равным

половине длины волны излучения. Если половина длины волны излучения меньше внутреннего масштаба турбулентности, то обратное рассеяние на данной длине волны практически не наблюдается.

Отражения от турбулентных неоднородностей показателя преломления весьма слабы и могут быть обнаружены лишь высокочувствительным радиолокатором.

Модели рассеяния радиоволн от верхней «шероховатой» стенки волновода «земля-атмосфера-земля»

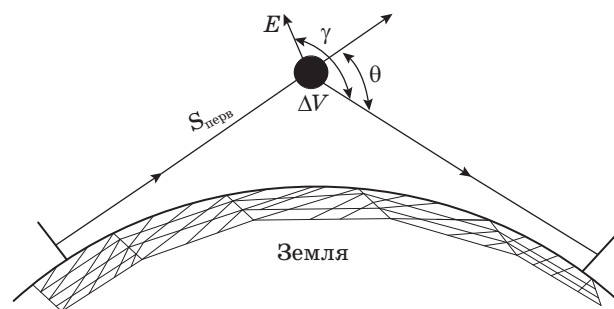
Перейдем к рассмотрению эффектов рассеяния при облучении зондирующими сигналами объемных неоднородностей в тропосфере земли (рис. 2).

Турбулентные неоднородности имеют средний размер l порядка десятка метров [2, 6, 7], поэтому можно считать, что в сантиметровом и миллиметровом диапазонах радиоволн, которые главным образом и применяются при радиозондировании атмосферы, соблюдается условие $l \gg \lambda$ [8–10].

Для расчета рассеяния радиоволн на турбулентных неоднородностях тропосферы используются известные модели рассеяния радиоволн, описывающие флуктуации диэлектрической проницаемости $\Delta\epsilon$: Колмогорова — Обухова [11]; Букера — Гордона [12]; Вилларса — Вайскопфа [11, 12] и др.

Как показывают расчеты, проведенные с помощью математических моделей, полученные результаты часто расходятся с экспериментальными данными, особенно при использовании модели Букера — Гордона. Однако для ориентировочных оценок часто применяют именно эту модель [10].

Более адекватным способом вычисления коэффициентов отражения R от тропосферы явля-



■ Рис. 2. Геометрия рассеяния от объемных неоднородностей в атмосфере: $S_{перв}$ — плотность потока энергии волны, падающей на каждый элемент рассеивающего объема ΔV ; γ, θ — углы рассеяния; E — напряженность электрического поля

ется использование точных решений одномерного волнового уравнения, которые существуют в случае представления потенциала в виде набора дельта-функций $q(x) = \sum_n q_n \delta(x - x_n)$ или набора

прямоугольников. Тогда задача расчета коэффициента отражения R сводится к вычислениям по обратной рекуррентной формуле с граничным условием $R_{n+1} = 0$. Расчет коэффициента отражения методом прямоугольников проводится по следующей обратной рекуррентной формуле:

$$R_n = \frac{(p_n - p_{n+1}) + R_{n+1} e^{2ip_{n+1} \Delta x_n} (p_n + p_{n+1})}{(p_n + p_{n+1}) + R_{n+1} e^{2ip_{n+1} \Delta x_n} (p_n - p_{n+1})},$$

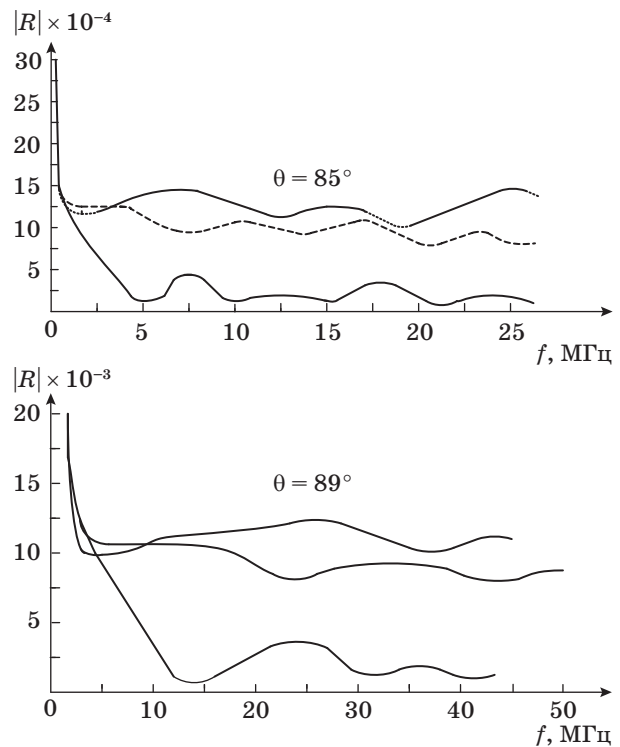
где $\Delta x_n = x_{n+1} - x_n$; $p_n = \sqrt{k^2 - q_n}$.

Однако при вычислении коэффициента отражения в области малых значений p_n возникают трудности. В этом случае коэффициент отражения следует рассматривать как $R_n = -1 + \varepsilon_n$, где n — показатель преломления тропосферы; ε_n — малая добавка (относительная диэлектрическая проницаемость):

$$\varepsilon_n = \frac{2p_n(1 + R_{n+1} e^{2ip_{n+1} \Delta x_n})}{(p_n + p_{n+1}) + R_{n+1} e^{2ip_{n+1} \Delta x_n} (p_n - p_{n+1})}.$$

Ниже приведены результаты численного анализа изменения модуля коэффициента отражения радиоволн при отражении от неоднородных структур тропосферы в зависимости от частоты ЭМ-волны и угла ее падения. Основной вклад в изменение коэффициента отражения вносят профили, содержащие большие градиенты показателя преломления на нижней и верхней границах тропосферы в слоистой атмосфере. Модуль коэффициента отражения $|R|$ для неоднородной тропосферы по эмпирическим оценкам составлял величину порядка 10^{-5} [13–15].

По реальным профилям показателя преломления тропосферы приведены вычисления модуля коэффициента отражения радиоволн для наклонного зондирования. Результаты расчета модуля коэффициента отражения $|R|$ при падении радиоволны на слой тропосферы под углом $\theta = 85^\circ$ и $\theta = 89^\circ$ представлены на рис. 3. Увеличение угла падения радиоволны θ приводит к возрастанию частотного масштаба осцилляций и амплитуды колебаний. Величина модуля коэффициента отражения для $\theta = 85^\circ$ имеет порядок 10^{-3} , а для $\theta = 89^\circ$ — на порядок выше, 10^{-2} . Чем более изрезана форма профиля показателя преломления, тем сложнее частотная зависимость коэффициента отражения. Таким образом, рассчитанные значения модуля коэффициента отражения на два-три порядка превышают его значения, оцененные в работах [13–15].



■ Рис. 3. Модуль коэффициента отражения $|R|$ при падении радиоволны на слой тропосферы под углом $\theta = 85^\circ$ и $\theta = 89^\circ$

Модели рассеяния радиоволн от нижней «шероховатой» стенки волновода «земля-атмосфера»

Когда ЭМ-волны отражаются от земной поверхности, их амплитуда затухает, а набег фазы изменяется случайным образом. Обычно рассматривают три коэффициента ослабления ЭМ-поля, которые способствуют этим эффектам и формируют итоговый коэффициент отражения от земли Γ_t : 1) коэффициент отражения от плоской поверхности $\Gamma_{V,H}$; 2) коэффициент отражения от шероховатой поверхности R_r ; 3) коэффициент дивергенции кривизны земли D . Рассмотрим подробнее эти три параметра.

Коэффициент отражения от гладкой поверхности

Коэффициент отражения от гладкой поверхности зависит от коэффициента диэлектрической проницаемости, а также от угла падения. Коэффициенты отражения для вертикальной (V) и горизонтальной (H) поляризации вычисляются по формулам [2–7]

$$\Gamma_V = |\Gamma_V| \exp(-j\phi_V) = \frac{\varepsilon \sin \psi_g - \sqrt{\varepsilon - (\cos \psi_g)^2}}{\varepsilon \sin \psi_g + \sqrt{\varepsilon - (\cos \psi_g)^2}};$$

$$\Gamma_H = |\Gamma_H| \exp(-j\varphi_H) = \frac{\sin \psi_g - \sqrt{\varepsilon - (\cos \psi_g)^2}}{\sin \psi_g + \sqrt{\varepsilon - (\cos \psi_g)^2}},$$

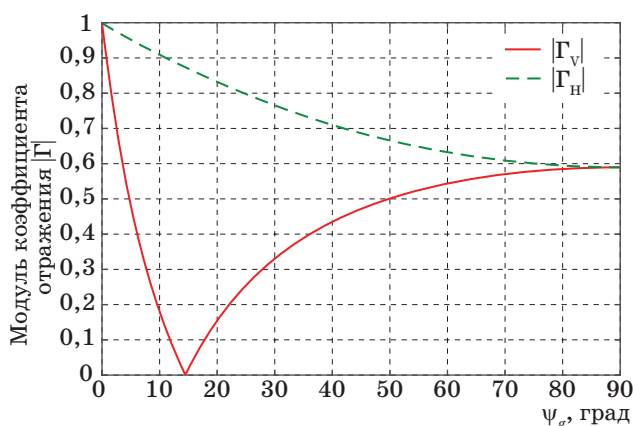
где ψ_g — угол скольжения; ε — комплексная относительная диэлектрическая проницаемость поверхности: $\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon''$. Здесь ε' и ε'' — действительная и мнимая части относительной диэлектрической проницаемости поверхности. Так, например, для обычной земли действительная часть $\varepsilon' \approx 15$, а мнимая часть

$$\varepsilon'' = \frac{\sigma}{f},$$

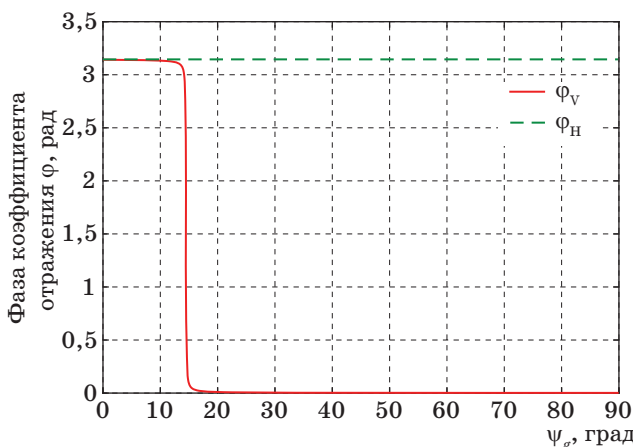
где f — несущая частота; σ — проводимость ($5 \cdot 10^{-3}$) [16].

Анализируя графики на рис. 4 и 5, можно сделать следующие выводы:

1) величина модуля коэффициента отражения горизонтальной поляризации равна единице при очень малых углах скольжения и монотонно убывает, когда угол увеличивается;



■ Рис. 4. Зависимость модуля коэффициента отражения $|\Gamma_H|$ и $|\Gamma_V|$ для гладкой поверхности от угла скольжения



■ Рис. 5. Зависимость фазы коэффициента отражения φ_H и φ_V от угла скольжения

2) величина вертикальной поляризации имеет четко определенный минимум. По этой причине бортовые радары летательных аппаратов в режиме обзора земной поверхности используют в основном вертикальную поляризацию, чтобы значительно уменьшить количество помех от рельефа местности;

3) для горизонтальной поляризации фаза практически постоянна, однако для вертикальной поляризации фаза стремится к нулю вблизи угла 15° ;

4) для очень малых углов (меньше 2°) модули коэффициентов отражения практически равны единице, а фазы практически равны π при углах, меньших 15° .

Когерентное и некогерентное рассеяние от «шероховатой» поверхности

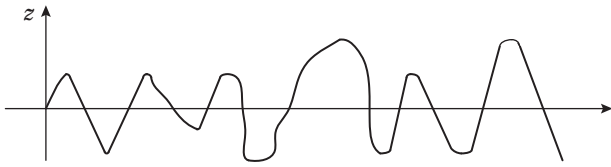
Шероховатость поверхности также влияет на общий коэффициент отражения от земной поверхности (рис. 6, а и б).

Прежде чем перейти к детальному математическому анализу, полезно рассмотреть некоторые общие характеристики рассеяния на шероховатой поверхности. Если поверхность слабошероховатая, то отраженная волна немного ослабляется из-за рассеяния, а мощность, соответствующая этому ослаблению, рассеивается в других направлениях. В случае сильношероховатой поверхности диаграмма рассеяния становится полностью изотропной, что показано на рис. 6, б штриховой линией.

Шероховатая поверхность может описываться случайными величинами ζ_z , распределенными по нормальному закону (рис. 7). Если шероховатость на произвольной высоте h распределяется в соответствии с законом Гаусса, со средним зна-



■ Рис. 6. Схема рассеяния волны от шероховатой поверхности (а) и общее представление о диаграмме рассеяния при различной степени шероховатости (б)



■ **Рис. 7.** Функция, описывающая шероховатость поверхности с помощью нормального закона распределения

чением $\langle z \rangle = z$ и дисперсией σ_z^2 , то можно записать это распределение как

$$p(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_z}} \exp\left\{-\frac{(z-\bar{z})^2}{2\sigma_z^2}\right\}.$$

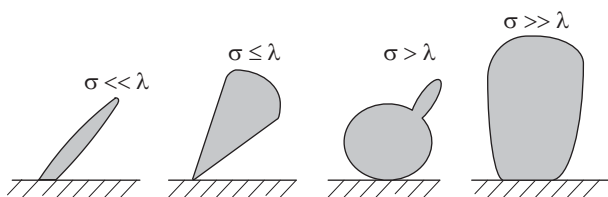
Есть несколько методов общей оценки поля в каналах распространения радиоволн над шероховатой местностью. В настоящее время существует три основных подхода к решению задачи рассеяния волн на шероховатой местности:

1) метод малых возмущений — применим к поверхности, слегка шероховатой, и когда поверхность склона много меньше длины волны ($\sigma_z \ll \lambda$); метод пригоден для описания поверхностей с малыми неровностями, причем наклоны поверхности должны быть меньше единицы [1–3];

2) приближение Кирхгофа — применим к поверхности, радиус кривизны которой гораздо больше, чем длина волны ($\sigma_z \gg \lambda$). Данное приближение применимо для поверхностей с радиусами кривизны, значительно превышающими длину волны. В этом приближении поле в каждой точке отражающей границы предполагается таким, каким оно было бы, если в данной точке заменить поверхность соответствующей касательной плоскостью [1–3];

3) приближение Релея — применим к поверхности, кривизна которой того же порядка, что и длина волны ($\sigma_z \geq \lambda$ и $\sigma_z \leq \lambda$) [3, 6].

Рассеянное поле на шероховатой поверхности визуально удобно представлять в виде диаграмм. Диаграммы рассеянного поля для различных случаев соотношения длины волны и стандартного отклонения от средней высоты приведены на рис. 8.



■ **Рис. 8.** Диаграммы рассеяния поля на поверхности раздела двух сред

Для диапазона волн от высоких до ультравысоких частот в основном применяется аппроксимация Релея. Остановимся на ней подробнее.

В случае шероховатости, когда $\sigma \geq \lambda$ и $\sigma \leq \lambda$, введем скалярный множитель Релея. При этом вместо зеркального отражения используем коэффициенты эффективного отражения для вертикальной и горизонтальной поляризации:

$$R_{V,H}^{ef} = R_{V,H} \exp\left[-2\left(2\pi\frac{\sigma}{\lambda}\sin\psi_g\right)^2\right], \quad (1)$$

где $\exp\left[-2\left(2\pi\frac{\sigma}{\lambda}\sin\psi_g\right)^2\right]$ именуется множителем

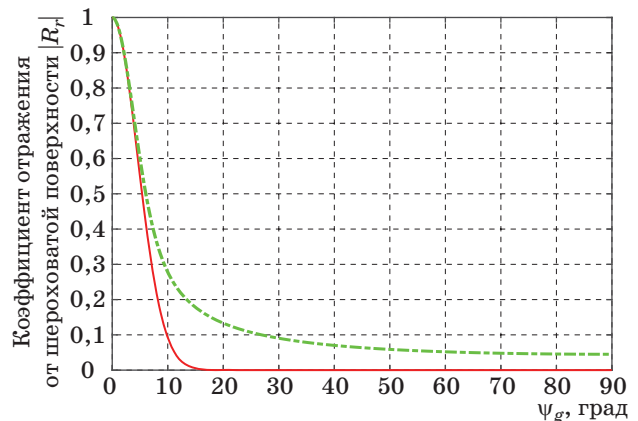
Релея [3, 6]. Другая форма для вычисления коэффициента отражения от шероховатой поверхности, которая в большей степени соответствует экспериментальным результатам, имеет вид

$$R_r = e^{-z} I_0(z), \quad z = 2\left(\frac{2\pi h_{rms} \sin\psi_g}{\lambda}\right)^2, \quad (2)$$

где I_0 — модифицированная функция Бесселя нулевого порядка; h_{rms} (или σ) — среднеквадратичное отклонение поверхности от среднего значения высоты неровностей $\langle \xi_z \rangle$.

График коэффициента отражения шероховатой поверхности в зависимости от ψ_g представлен на рис. 9. Пунктирная линия иллюстрирует значения коэффициента Релея из (1), тогда как сплошная линия иллюстрирует уравнение (2).

Наличие шероховатости перераспределяет энергию рассеиваемой волны и происходит «перекачка» энергии от когерентной составляющей энергии или мощности сигнала к ее некогерентной составляющей.



■ **Рис. 9.** Коэффициент отражения от шероховатой поверхности в зависимости от угла скольжения

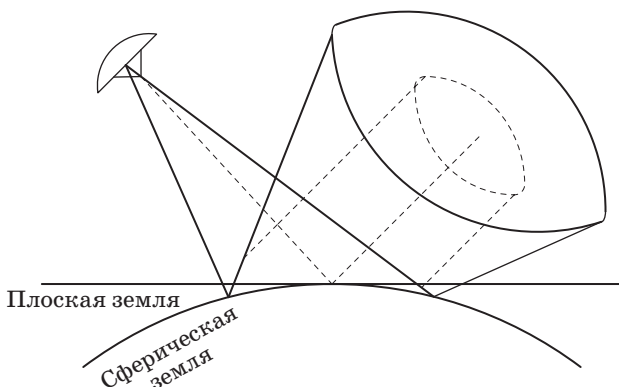
Коэффициент дивергенции

Общий коэффициент отражения также зависит от кривизны земли. Когда электромагнитная волна падает на круглую поверхность земли, отраженная волна расходится из-за кривизны земной поверхности (рис. 10). Из-за расхождения отраженная энергия становится расфокусированной, а плотность мощности излучаемого сигнала снижается, что учитывается коэффициентом дивергенции D . Коэффициент дивергенции может быть получен с помощью геометрических соотношений (рис. 11) и вычислен как

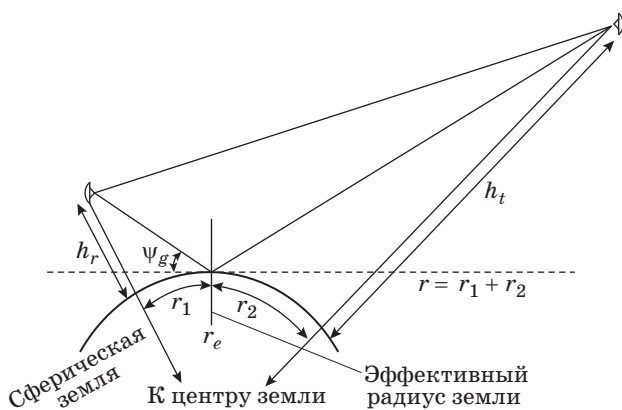
$$D = \frac{r_e r \sin \psi_g}{\sqrt{[(2r_1 r_2 / \cos \psi_g) + r_e r \sin \psi_g](1 + h_r / r_e)(1 + h_t / r_e)}} \quad (3)$$

Поскольку значение ψ_g всегда мало, когда расхождение D очень велико, то следующее приближение справедливо для большинства случаев использования радаров:

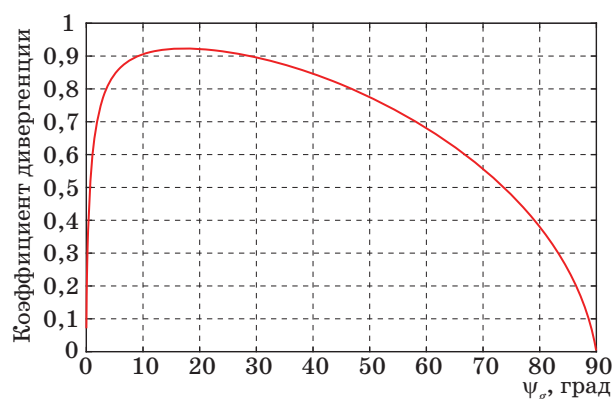
$$D \approx \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{4r_1 r_2}{r_e r \sin 2\psi_g}}}$$



■ Рис. 10. Эффект дивергенции



■ Рис. 11. Определение параметров выражения (3)



■ Рис. 12. Эффект дивергенции в зависимости от угла скольжения

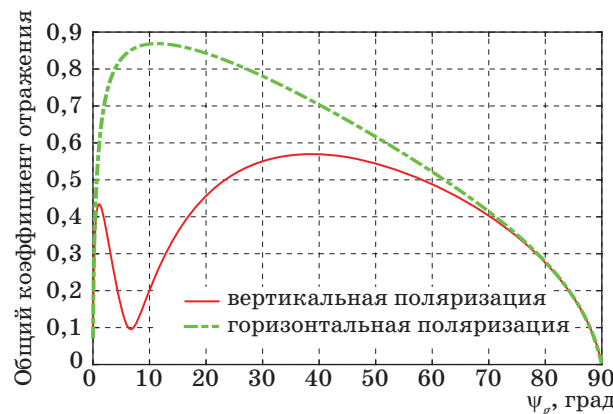
Зависимость дивергенции от угла скольжения показана на рис. 12 с параметрами r_1 и r_2 , представленными через высоты h_r и h_t и угол ψ_g .

Общий коэффициент отражения от земной и морской поверхности (нижняя стенка волновода «земля-атмосфера»)

В общем случае при отражениях от шероховатой поверхности электромагнитные волны претерпевают изменения в фазе и амплитуде, что приводит к диффузным (не когерентным) частям отраженного сигнала. Сочетание эффектов коэффициента отражения от гладкой поверхности, коэффициента дивергенции и коэффициента отражения от шероховатой поверхности можно выразить в виде общего коэффициента отражения Γ_t как

$$|\Gamma_t| = |\Gamma_{(H,V)}| D R_r,$$

где $\Gamma_{(H,V)}$ — это коэффициент отражения для горизонтальной или вертикальной поляризации от гладкой поверхности; D — дивергенция; R_r — коэффициент отражения от шероховатой поверхности.



■ Рис. 13. Абсолютная величина общего коэффициента отражения в зависимости от угла скольжения

Аналогично с поведением модуля коэффициента отражения (2), в зависимости от модуля общего коэффициента отражения с учетом кривизны и шероховатости, наблюдаем минимум в диапазоне углов $5 \div 7^\circ$ для вертикальной поляризации (рис. 13). В то же время при горизонтальной поляризации при тех же углах наблюдаем максимум зависимости Γ_t от углов скольжения.

Метод численного расчета поля для распространения радиоволн в канале «земля-атмосфера»

Выше были показаны модели отражения от двух плоскостей — нижней и верхней стенки — в отдельности. Определим итоговую модель рассеяния радиоволн в канале «земля-атмосфера» как следующую конволюцию коэффициентов рассеяния (рис. 14):

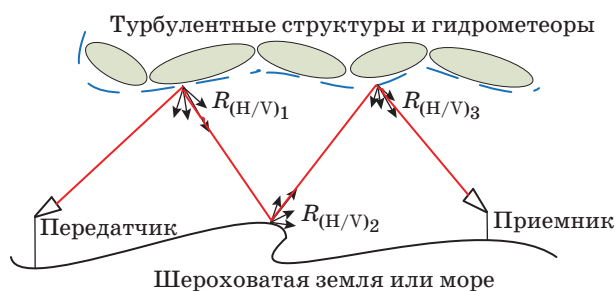
$$P_{total} = P_0 R_{(H/V)_1} R_{(H/V)_2} R_{(H/V)_3},$$

где $R_{(H/V)_1}, R_{(H/V)_3}$ — коэффициенты отражения от турбулентной структуры или гидрометеора, а $R_{(H/V)_2}$ — коэффициенты отражения от шероховатой поверхности земли или моря для горизонтальной и вертикальной поляризации волны.

Для определения вторичного излучения используем теорию Келлера [5, 6], в соответствии с которой поле n -кратно-отраженных лучей от элементов поверхности вычисляется как

$$E_d^{(n)} = D_1 D_2 \dots D_n \exp(ikp_0) / |p_0 \left(\frac{1+p^{(n)}}{p_0} \right)^{1/2} E_0. \quad (4)$$

Применяя формулу (4) в конкретном случае и рассматривая поперечное сечение в вертикальном направлении $y = y_0 = y_1 = 0$, возможно легко анализировать компоненты дифрагированного поля. Затем, используя формулы для однократных отражений, мы можем получить компоненты вторичного дифрагированного поля. Анализ компонент E_{dx}, E_{dy} и E_{dz} дифрагированного поля для разных расстояний от излучателя и разной высоты рассеивателей указывает, что затухание



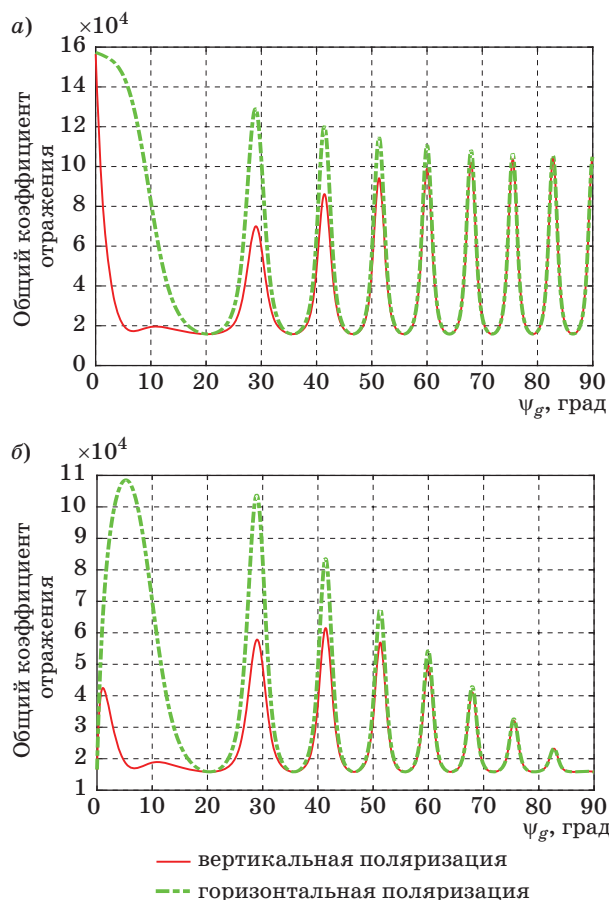
■ **Рис. 14.** Метод численного расчета поля для распространения радиоволн в канале «земля-атмосфера»

поля, вызванного вторичной дифракцией, меняется от 60 до 80 дБ по сравнению с падающим полем E_0 в свободном пространстве для длин волн от 10 до 30 см. Таким образом, мы можем пренебречь эффектами вторичного дифрагированного поля в общем распределении поля в волноводе в рассматриваемом частотном диапазоне.

Численный расчет канала «земля-атмосфера-земля»

Используя приведенные выше формулы сечения рассеивания от турбулентных структур и гидрометеоров и объединяя результаты, полученные в работах [2, 3, 6, 7] (переотражения от шероховатых поверхностей земли), выполним численный расчет распространения радиоволн в канале «земля-атмосфера-земля».

Зададим следующие параметры: ширина пучка $\theta_1 = 2^\circ$; длина волны $\lambda = 3$ см; ширина диаграммы направленности приемника $\theta_2 = 2^\circ$; расстояния до общего объема $R_1 = R_2 = 1000$ км; угол рассеяния $\theta_s = 20^\circ$; коэффициенты усиления



■ **Рис. 15.** Зависимость мощности поля от угла скольжения при распространении радиоволн в канале «земля-атмосфера» без учета (а) и с учетом (б) шероховатостей

антенны на прием и передачу $G_t = G_r = \pi^2/\theta_1^2 = 8100$; начальная мощность передатчика $P_0 = 10^6$ Вт.

Таким образом, мы получаем среднюю мощность сигнала при распространении электромагнитной волны в канале «шероховатая земля-атмосфера» (рис. 15). Из представленных графиков следует, что:

- 1) при углах скольжения ψ_g в диапазоне $5 \div 7^\circ$, максимум согласуется с общим коэффициентом Γ_i ;
- 2) когерентная составляющая мощности сигнала «расширяется» за счет многократного рассеивания на шероховатостях. В спектре сигнала появляются «некогерентные» гармоники со случайными набегом фазы и амплитудой радиосигнала.

Заключение

Основной задачей исследования являлась разработка имитационной модели для расчета средней мощности радиосигнала применительно к режиму загоризонтной локации. Предложен

новый метод расчета и математическая модель распространения радиоволн в канале «земля-атмосфера». Для разработанной модели были взяты за основу следующие эффекты: строение атмосферы; строение гидрометеоров; турбулентность атмосферы; отражающие свойства от турбулентных неоднородностей атмосферы; учет влияния гидрометеоров на затухание и фединг сигнала. Разработан метод численного расчета дифракционного поля для распространения радиоволн в канале «земля-атмосфера». Проведен анализ процесса влияния среды на радиосигнал, поглощаемый, рассеиваемый и дифрагированный на шероховатой поверхности волновода «земля-атмосфера». Получена самосогласованная модель, объединяющая всевозможные физические эффекты, отражение, рассеивание и дифракцию, а также проанализирован численно вклад каждого из эффектов в полное поле, излучаемое источником, находящимся в волноводе «земля-атмосфера». Полученные результаты позволяют проанализировать реальные радиоканалы загоризонтной локации.

Литература

1. Рытов С. М., Кравцов Ю. А., Татарский В. И. Введение в статистическую радиофизику. Ч. II: Случайные поля. — М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1978. — 484 с.
2. Исимару А. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. Т. 2: Многократное рассеяние, турбулентность, шероховатые поверхности и дистанционное зондирование. — М.: Мир, 1981. — 319 с.
3. Басс Ф. Г., Фукс И. М. Рассеяние волн на статистически неровной поверхности. — М.: Наука, 1972. — 424 с.
4. Andersen J. Bach. Array Gain and Capacity for Known Random Channels with Multiple Element Arrays at Both Ends// IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 2000. Vol. 18. N 11. P. 2172–2178.
5. Andersen J. Bach. Antenna Arrays in Mobile Communications: Gain, Diversity, and Channel Capacity// IEEE Antennas and Propagation Magazine. 2000. Vol. 42. N 2. P. 12–16.
6. Blaunstein N., Ch. Christodoulou. Radio Propagation and Adaptive Antennas for Wireless Communication Links: Terrestrial, Atmospheric and Ionospheric. 1st ed. — New York, Taylor and France, 2007. — 614 p.
7. Blaunstein N., Ch. Christodoulou. Radio Propagation and Adaptive Antennas for Wireless Communication Networks: Wiley Series in Microwave and Optical Engineering. Second ed. — Wiley, 2014. — 760 p.
8. Арманд Н. А., Палатов К. И. Проблемы радиотехники и радиофизики// Радиотехника и радиоэлектроника. 1993. Т. 38. № 10. С. 1734–1750.
9. Фейнберг Е. Л. Распространение радиоволн вдоль земной поверхности. — М.: Изд-во АН СССР, 1961. — 546 с.
10. Бреховских Л. М. Дифракция электромагнитных волн на неровной поверхности// ДАН СССР. 1951. Т. 81. № 6. С. 1023–1026.
11. Исакович М. А. Рассеяние волн от статистически шероховатой поверхности// ЖЭТФ. 1952. Т. 23. № 3. С. 305–314.
12. Шмелев А. Б. Рассеивание волн статистически неровными поверхностями// УФН. 1972. Т. 106. № 3. С. 459–475.
13. Красюк Н. П., Коблов В. Л., Красюк В. Н. Влияние тропосферы и подстилающей поверхности на работу РЛС. — М.: Радио и связь, 1988. — 216 с.
14. Казаков Л. Я., Ломакин А. Н. Неоднородности коэффициента преломления воздуха в тропосфере/ АН СССР; Ин-т радиотехники и электроники. — М.: Наука, 1976. — 163 с.
15. Паршуков В. А., Зражевский А. Ю., Новичихин Е. П. Влияние нижней части пограничного слоя атмосферы на астрономическую радиорефракцию// Тез. докл. XXVI Радиоастрономической конф. — СПб.: ИПА РАН, 1995. С. 279–280.
16. Блаунштейн Н. Ш., Сергеев М. Б., Шепета А. П. Прикладные аспекты электродинамики. — СПб.: Аграф+, 2016. — 272 с.

UDC 621.371

doi:10.15217/issn1684-8853.2016.6.25

Modeling Radio Wave Propagation in an Earth-Atmosphere ChannelNenashev V. A.^a, Assistant Professor, nenashev.va@gmail.comBlaunstein N. S.^b, Dr. Sc., Phys.-Math., Professor, nathan.blaunstein@hotmail.com^aSaint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaya St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation^bBen-Gurion University of the Negev, POB 653, 1, Ben Gurion St., Beer Sheva, 74105, Israel

Purpose: The goal is to model and analyze radio wave propagation in an earth-atmosphere channel, taking into account the dispersion coefficient variations. It is especially interesting to study the propagation of radio waves in an earth-atmosphere channel at an over-the-horizon location with complicated weather and climatic conditions, when the bottom wall is a rough ground surface, and the upper wall is an atmospheric turbulence structure. **Methods:** We use the methods of analyzing the scattering of electromagnetic waves from rough surfaces and from atmospheric turbulent structures; methods of modeling radio wave propagation in a waveguide with rough walls; methods of the probability theory and mathematical statistics applied to the fluctuations of the electromagnetic parameters of an earth-atmosphere channel. **Results:** We have obtained the characteristics of reflecting features of a rough ground surface and atmosphere with turbulent formations, taking into account hydrometeors which can affect the signal attenuation when it propagates in an earth-atmosphere channel. For the model, we accepted the following conditions: atmosphere structure, hydrometeor structure, atmospheric turbulence, the reflective properties of the turbulent atmosphere inhomogeneities, and the way the hydrometeors affect the attenuation and fading of a signal. A method has been proposed for numerical calculation of an electromagnetic field when it propagates in an earth-atmosphere channel. **Practical relevance:** The proposed radio wave propagation model is adequate to a real earth-atmosphere radio channel. You can use it in computer experiments developing algorithms for data transmission over long distances, as well as in semimatural experiments testing OTH radar equipment.

Keywords — Mathematical Channel Model, OTH Propagation of Radio Waves, Rough Waveguide, Ground Surface, Atmosphere, Turbulent Heterogeneities.

References

- Rytov S. M., Kravtsov I. A., Tatarskii V. I. *Vvedenie v statisticheskuiu radiofiziku. Ch. II: Sluchainye polia* [Introduction into Statistical Radiophysics. Part II. Random Fields]. Moscow, Nauka Publ., 1978. 484 p. (In Russian).
- Akira Ishimaru. *Wave Propagation and Scattering in Random Media. Vol. 2. Multiple Scattering, Turbulence, Rough Surfaces, and Remote-Sensing*. Academic Press, 1978. 339 p.
- Bass F. G., Fuks I. M. *Wave Scattering from Statistically Rough Surface*. Oxford, Pergamon press, 1979.
- Andersen J. Bach. Array Gain and Capacity for Known Random Channels with Multiple Element Arrays at Both Ends. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2000, vol. 18, no. 11, pp. 2172–2178.
- Andersen J. Bach. Antenna Arrays in Mobile Communications: Gain, Diversity, and Channel Capacity. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2000, vol. 42, no. 2, pp. 12–16.
- Blaunstein N., Ch. Christodoulou. *Radio Propagation and Adaptive Antennas for Wireless Communication Links: Terrestrial, Atmospheric and Ionospheric*. 1st ed., New York, Taylor and France, 2007. 614 p.
- Blaunstein N., Ch. Christodoulou. *Radio Propagation and Adaptive Antennas for Wireless Communication Networks*: Wiley Series in Microwave and Optical Engineering. Second ed., Wiley, 2014. 760 p.
- Armand N. A., Palatov K. I. Problems of Radio Engineering and Radio Physics. *Radioelektronika i radioelektronika*, 1993, no. 10(38), pp. 1734–1750 (In Russian).
- Feinberg E. L. *Rasprostranenie radiovoln vdol' zemnoi poverkhnosti* [Propagation of Radio Waves along the Terrestrial Surface]. Moscow, Akademiia nauk SSSR Publ., 1961. 546 p. (In Russian).
- Brekhovskikh L. M. Diffraction of Electromagnetic Waves on a Rough Surface. *Doklady Akademii nauk SSSR*, 1951, no. 6(81), pp. 1023–1026 (In Russian).
- Isakovich M. A. Wave Scattering from Statistically Rough Surface. *ZhETF*, 1952, no. 3(23), pp. 305–314 (In Russian).
- Shmelev A. B. Wave Scattering by Statistically Uneven Surfaces. *Uspekhi fizicheskikh nauk* (Advances in Physical Sciences), 1972, no. 3(106), pp. 459–475 (In Russian).
- Krasiuk N. P., Koblov V. L., Krasiuk V. N. *Vliianie troposfery i podstilaiushchei poverkhnosti na rabotu RLS* [Effect of the Troposphere and the Underlying Surface to work the Radar]. Moscow, Radio i sviaz' Publ., 1988. 216 p. (In Russian).
- Kazakov L. I., Lomakin A. N. *Neodnorodnosti koeffitsienta prelomleniia vozdukh v troposfere* [Discontinuity Coefficient of Refraction of Air in the Troposphere]. Moscow, Nauka Publ., 1976. 163 p. (In Russian).
- Parshukov V. A., Zrazhevskii A. I., Novichikhin E. P. Impact the Bottom of the Atmospheric Boundary Layer on the Astronomical Radiorefraction. *Tezisy dokladov XXVI Radioastronomicheskoi konf.* [Proc. of XXII Radio Astronomy Conf.], Saint-Petersburg, IPA RAN, 1995, pp. 279–280 (In Russian).
- Blaunstein N. Sh., Sergeev M. B., Shepeta A. P. *Prikladnye aspekty elektrodinamiki* [Applied Aspects of Electrodynamics]. Saint-Petersburg, Agraf +, 2016. 272 p. (In Russian).

СИСТЕМА ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА МОДЕЛЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

В. В. Шмелев^а, канд. техн. наук

М. Ю. Охтилев^б, доктор техн. наук, профессор

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

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

Введение: технологический процесс в предметной области мониторинга функционирования ракетно-космической техники и обработки и анализа измерительной информации в общем случае является нестационарным конечномерным нелинейным процессом с дискретным временем. В настоящее время известно множество способов представления модели такого технологического процесса. Технологический процесс управляется по алгоритму, в данной предметной области — управляющему алгоритму. Модель процесса — инструмент описания алгоритма. Полностью адекватная предметной области модель в значительной степени уменьшает время создания управляющего алгоритма. **Цель:** разработать показатели сравнения представителей известных подходов к моделированию технологических процессов в предметной области, выявить достоинства и недостатки на примере практических внедрений подходов, определить наиболее пригодный подход. **Результаты:** всего приведено 17 показателей в пяти группах. Первая группа позволяет оценить подход на применимость для передачи многоаспектной сложности технологических процессов, вторая — на способность учитывать ограничения на траекторию развития процесса, третья — на пригодность для программно-алгоритмической реализации, четвертая — на степень удобства с позиции оператора при автоматизированном синтезе модели технологического процесса и пятая — на промышленную применимость. Критерии апробированы на представителях подходов, получивших глубокое практическое применение в области контроля и управления технологическими процессами функционирования ракет-носителей и космических аппаратов. Среди рассматриваемых подходов в качестве наиболее пригодного определен структурно-логический подход, основанный на симбиозе комплексного, логико-алгебраического и логического подходов. **Практическая значимость:** полученные результаты целесообразно применять для обеспечения прикладного характера квалиметрии используемой модели технологических процессов в предметной области, для обоснования направлений информационного поиска практических примеров внедрения специального программного обеспечения мониторинга технологических процессов в предметной области.

Ключевые слова — ракетно-космическая техника, моделирование технологических процессов, квалиметрия моделей, структурно-логический подход.

Введение

В предметной области мониторинга технологических процессов функционирования ракетно-космической техники (РКТ) и обработки измерительной информации автоматическое (автоматизированное) управление заключается в выполнении управляющего алгоритма [1]. Управляющий алгоритм — это строгая последовательно-параллельная совокупность действий по переводу технического процесса из начального в конечное состояние с требуемым показателем качества.

В основе управляющего алгоритма лежит модель управляемого технологического процесса, которая является инструментом описания алгоритма. Использование совершенной модели, как можно более простой, но адекватной управляемому процессу, позволит значительно сократить трудозатраты и затраты других видов ресурсов при создании управляющих алгоритмов.

В работе [2] приведены определение технологического процесса и классификация известных подходов к моделированию процессов в предметной области.

Технологический процесс испытаний и эксплуатации РКТ, обработки и анализа измерительной информации является нестационарным конечномерным конечным нелинейным процессом с дискретным временем.

Известные модели целесообразно разделить на четыре группы подходов.

Первая группа, начинающаяся с вершины математических подходов, может быть названа функциональной. В основе подходов данной группы находится преимущественное применение математических формализмов — функциональных зависимостей, определяющих текущее состояние моделируемого процесса как функции от аргументов.

Алгебраическая группа основана на описании взаимодействующих процессов. Здесь процессы строятся на базисе атомарных операций с помощью набора алгебраических операций. Алгебра процессов — это любая математическая структура, удовлетворяющая системе аксиом, описывающих требуемые свойства основных операторов.

Третья группа — это подходы, основанные на временной (темпоральной, событийной, пошаго-

вой) логике. При этом в качестве модели процесса используется конечная система переходов.

При необходимости представления не траектории процесса, а смысловой причинно-следственной связи между операциями процесса, используются подходы структурной группы.

Материал статьи [2] позволяет сделать вывод о значительном количестве доступных к использованию в предметной области подходов. Поэтому задача квалиметрии моделей является чрезвычайно актуальной.

В настоящей статье сформулированы показатели качества моделей и проведено сравнение известных подходов к моделированию технологических процессов. Каждый подход сопровождается ссылками на конкретные примеры прикладной реализации. Дополнительно к известным в сравнении участвует разработанный авторами структурно-логический подход к моделированию технологических процессов в предметной области испытаний и эксплуатации РКТ, обработки и анализа измерительной информации, подробно изложенный в работах [3–5].

Общая классификация критериев сравнения подходов к моделированию технологических процессов

После рассмотрения основных подходов к моделированию технологических процессов в предметной области [2] необходимо ввести критерии сравнения подходов. Целью сравнения будет являться получение, конечно, в некоторой степени субъективной и качественной, оценки типовых представителей подходов. При этом целенаправленно идет речь только о представителях подходов, а не о самих подходах. Причиной этого является существенная разница в эффективности подхода в зависимости от его конкретной реализации и области практического приложения.

На основании работ [6–8] 17 критериев сравнения сведены в пять групп, графически квалиметрия подходов к моделированию технологических процессов в предметной области представлена на рисунке.

Рассмотрим каждую группу критериев отдельно по составляющим.

Применимость модели для передачи сложности процесса

Первая группа критериев позволяет сделать вывод о применимости модели для передачи многоаспектной сложности [9] технологических процессов в предметной области. Критериями в данной группе являются:

1. Возможность реализации иерархичности технологического процесса. Данный показатель заключается в возможности составления

модели процесса, структурно состоящего из подпроцессов неограниченной вложенности. Необходимость реализации такой возможности обуславливается агрегированием многоэтапного процесса, например, обработки и анализа измерительной информации по результатам полета ракеты-носителя. Указанный процесс в типовом варианте состоит из более чем 2000 операций, и для уменьшения ресурсоемкости моделирования требуется создание многоуровневой системы моделирования.

2. Возможность реализации модели событийного и совмещенного (с временным) технологического процесса. Необходимость возможности моделирования событийного технологического процесса обосновывается следующим фактором. Некоторые технологические процессы функционирования агрегатов и систем ракеты-носителя предусматривают двойственные единицы измерения: временные и специальные физические, причем временная шкала не всегда имеет преимущественное значение. В качестве примера можно привести процесс расхода топлива, который контролируется не по времени, а по фактам прохождения уровнем топлива характерных отметок в долях полного бака: 20, 40 % и т. д.

3. Возможность моделирования параллельных технологических операций, составляющих процесс. Возможность моделирования развивающихся одновременно технологических процессов является необходимой без сомнения. Реализация «виртуальной параллельности» процессов, когда осуществляется быстрое переключение между элементами, является недопустимой. Ведь РКТ представляет собой совокупность большого числа одновременно изменяющихся состояние систем.

4. Возможность реализации вычислительных процедур с результатами телеизмерений. Отличительной чертой технологических процессов функционирования РКТ является неопределенность фазовой траектории процесса до момента начала его выполнения. При этом траектория зависит не только от моментов времени начала или окончания каких-либо операций, но и от результатов мониторинга состояния систем техники. Это накладывает на модель процесса необходимость возможности реализации вычислительных процедур с результатами телеизмерений, для этого желательно использовать единый инструментарий. Например, сетевые графики такой возможностью не обладают, в отличие от логико-динамических моделей. Примером технологического процесса, развитие которого зависит от результатов обработки и анализа телеизмерений, можно назвать процесс выработки решения на аварийное выключение двигателей ракеты-носителя: для принятия решения необходимо изме-



■ Критерии сравнения основных подходов к моделированию технологических процессов

речь, обработать и проанализировать в том числе отклонения истинных параметров движения от расчетных.

Способность модели учитывать ограничения на процесс

Вторая группа критериев позволяет сделать вывод о способности модели учитывать ограничения различного рода на траекторию развития процесса.

5. Возможность реализации технологических ограничений на траекторию процесса. Данный критерий позволяет выполнять моделирование процессов, развитие которых определяется специальной технологией с системой ограничений, включающей четыре вида отношений [10, 11]: отношение совместности, отношение несовместности, отношение следования и отношение без-

различия, дополняющее систему отношений до полной.

6. Возможность реализации ресурсных, временных и краевых ограничений на траекторию процесса [10, 11]. Необходимость реализации данного вида ограничений вызывается использованием не только временного алгоритма операций в предметной области. Наглядным примером можно назвать процесс терминального управления полетом ракеты-носителя. Данный процесс определяется не временем полета, а обеспечением в заданной точке траектории полета (точке отделения полезной нагрузки) необходимых кинематических параметров движения разгонного блока.

Последний критерий в совокупности с критериями реализации технологических ограничений и реализации вычислительных процедур позволяет в полной мере охватить перечень воз-

можных условий ветвления траектории развития технологических процессов в предметной области. В том числе и вариант ручного управления процессом, который реализуется введением дополнительной переменной, значение которой меняет оператор.

Пригодность модели для программно-алгоритмической реализации

Третья группа критериев позволяет оценить степень пригодности метода моделирования для программно-алгоритмической реализации. Не вызывает сомнений, что целесообразность практического применения метода обеспечивается в том числе и трудоёмкостью его приложения к конкретной практической задаче. В соответствии с работами [7, 8], степень пригодности метода моделирования для программно-алгоритмической реализации можно оценить как минимум качественно возможностью решения задач спецификации, синтеза, верификации и определения характеристик технологического процесса, модель которого представлена по анализируемому подходу. Первоначально указанные задачи применялись к специальному программному обеспечению мониторинга технологических процессов в предметной области. Однако необходимо проецировать решаемость этих задач как критериев качества и на метод моделирования, так как в основе программного обеспечения лежит алгоритм (в рассматриваемом приложении управляющий), а алгоритм в свою очередь, как уже говорилось ранее, реализуется с использованием возможностей применяемой модели.

7. Реализуемость спецификации модели технологического процесса. Задача спецификации модели — это задача точного и однозначного задания того, как должен развиваться процесс во времени или в событийных отсчетах. Важнейшими свойствами спецификации должны являться непротиворечивость, адекватность требованиям и задачам, решаемым технологическим процессом, и реализуемость модели имеющимися аппаратными и системными программными средствами в специальном программном обеспечении.

8. Реализуемость синтеза модели технологического процесса. Задача является наиболее важной в практическом плане и представляет собой проблему построения или автоматической генерации модели процесса по его спецификации.

9. Реализуемость верификации модели. Задача верификации модели — это задача проверки соответствия разработанной модели ее спецификации, т. е. проверки того, действительно ли технологический процесс решает те задачи, которые на него возлагаются. Традиционным путем решения задачи верификации является тестирование. Однако тестирование не гарантирует

действительного 100%-го соответствия модели ее спецификации (за исключением искусственно сконструированных простейших случаев). В связи с этим привлекательным направлением исследований остается поиск путей формальной верификации.

10. Реализуемость определения характеристик модели. Задача определения характеристик модели процесса (правильнее говорить о характеристиках непосредственно процесса) заключается в обеспечении для модели классического свойства наблюдаемости. Данное свойство модели следует сформулировать как обеспечение с помощью модели возможности измерять характеристики процесса (временные, ресурсные). Его наличие является необходимым для проведения мониторинга (контроля и прогнозирования) траекторий развития процесса.

Применимость модели для передачи сложности процесса

Процесс создания модели технологического процесса — это совокупность этапов спецификации, синтеза и верификации модели. По содержанию этапов можно утверждать, что «создание модели процесса» аналогично по смыслу и содержанию понятиям «программирование» или «создание программы». Поэтому к способу моделирования применимы критерии, аналогичные критериям, по которым сравниваются среды программирования. То есть способ моделирования — это тоже среда моделирования или среда программирования. Исходя из сказанного, целесообразно ввести четвертую группу критериев, позволяющих оценить удобство использования подхода к моделированию с позиции оператора при автоматизированном синтезе модели технологического процесса.

11. Возможность реализации концепции переходов, а не состояний. Данный критерий заключается в трудоёмкости моделирования сложных процессов, количество состояний которых столь многочисленно, что превышает вычислительные возможности аппаратных средств. Примером подхода к моделированию, использующего концепцию состояний, является аппарат конечных автоматов. Примером подхода к моделированию с использованием концепции переходов можно назвать сети Петри. В предметной области функционирования РКТ на основании изложенного ранее принципа дискретизации времени можно сделать вывод об особенной актуальности выполнения данного критерия.

12. Возможность реализации описания потоков управлений, структур данных и потоков данных, в противовес описанию конкретных экземпляров данных. Модель должна поддерживать типизацию циркулирующей информации.

Это обеспечивается за счет модификации коренных методов моделирования. Например, описание структур данных поддерживается «раскрашенными» сетями Петри. Описание потоков управлений и данных обеспечивается введением дополнительных типов соединительных дуг в графовых методах темпоральной группы.

Следующие четыре критерия данной группы сформулированы в предположении о том, что подходы к моделированию технологических процессов прошли историческое развитие подобно языкам программирования от первого до четвертого поколений (первое — машинные коды, второе — ассемблер, третье — «языки высокого уровня» и четвертое — современное). А четвертому поколению как раз свойственно выполнение следующих четырех критериев.

13. Возможность реализации проблемно-ориентированного подхода к моделированию. Данный критерий подразумевает обязательное использование понятия агентов при моделировании, на которых могут быть построены специфичные, характерные только для конкретной предметной области агрегаты. Их использование значительно ускорит процесс синтеза модели, особенно оператором без основательной предварительной подготовки.

14. Возможность реализации декларативного подхода к моделированию. Критерий заключается в такой организации синтеза модели технологического процесса, когда нет необходимости описывать процесс на императивном уровне в виде, например, сетевого графика, или конечного автомата, или системы дифференциальных уравнений. Декларативный подход обеспечивает возможность задания оператором только (или почти только) граничных состояний процесса и, при необходимости, ограничений различного рода на формируемую при этом автоматически траекторию развития процесса.

15. Возможность реализации визуального (графического) подхода к синтезу модели процесса. Критерий заключается в том, что синтез модели как текста заменяется в определенном масштабе ее изображением в виде графической диаграммы («рисованием»). При этом, опять же, необходимо ввести понятия агента и агрегата. Тогда опера-

ция, как составляющая процесса, может быть заменена агрегатом, если у агрегата присутствуют элементы управления (входы) и элементы наблюдения (выходы). Логико-лингвистические методы моделирования слабо удовлетворяют данному критерию по причине нахождения в их основе символов, а, например, имитационные методы достаточно успешно визуализируются в специальном программном обеспечении благодаря нахождению в их основе типовых операций, заменяемых неизменными агрегатами.

16. Возможность использования естественно-го языка при синтезе модели процесса. Критерий заключается в обеспечении возможности «общения» оператора с программой моделирования на естественном для оператора языке, когда он говорит (именно говорит или, что эквивалентно, вводит на ЭВМ вербальные инструкции) о том, что и как должен выполнять процесс. Этот критерий является, естественно, невыполнимым в общем случае, однако в некоторой узкой предметной области определенные успехи могут быть получены.

Существование программной среды промышленного уровня

Последний критерий, составляющий в единственном числе пятую группу, показывает промышленную применимость подхода.

17. Существование программной среды промышленного уровня с реализацией функций CASE-средств. Критерий заключается в выводе в широкое публичное применение программной среды мониторинга, использующей данную модель технологических процессов. Это является неопровержимым признаком высокой эффективности используемого подхода.

Таким образом, изложено содержимое 17 бинарных (качественных) критериев сравнения способов моделирования технологических процессов в предметной области.

Непосредственно результаты проверки критериев представлены в таблице. Символ «+» обозначает выполнение критерия, «-» — невыполнение. В столбце 2 приведены ссылки на источники с описанием применяемого способа моделирования того или иного технологического процесса

■ Результаты проверки критериев сравнения

Представители подходов к моделированию процессов в предметной области	Источник описания способа моделирования	Группы критериев, критерии сравнения																	Σ
		I				II				III				IV				V	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Простая знаковая модель																			
Диаграмма Ганта на основе рекурсивной модели	[12]	+	-	+	-	-	-	+	+	+	+	+	-	+	-	+	-	+	10
																		[13]	

■ Окончание таблицы

Представители подходов к моделированию процессов в предметной области	Источник описания способа моделирования	Группы критериев, критерии сравнения																	Σ		
		I				II				III				IV				V			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20		
Аналитическая модель																					
Уравнения непрерывной системной динамики	[10, 11, 14, 15]	-	-	-	+	+	+	+	+	-	+	+	+	-	-	-	-	+	[14, 15]	9	
Логико-алгебраическая модель (ЛА)																					
Автоматная модель	[16]	+	+	+	-	+	-	+	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	6	
Триадная модель	[17]	+	+	+	-	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	[17, 18]	14
Дескриптивная модель																					
Теоретико-множественная модель процесса	[19]	+	+	-	-	+	+	+	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	7	
Онтологическая модель процесса	[20]	+	+	-	-	-	-	+	-	-	-	-	+	+	-	+	+	+	+	8	
Логико-лингвистическая модель																					
Модель на основе формальных систем	[21]	-	+	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+	+	11	
Комплексная модель (К)																					
Модель на основе классической сети Петри	[22]	+	+	+	-	+	-	+	+	+	-	+	-	-	+	+	-	-	+	11	
Модель на основе ВРС-сетей	[24]	-	-	+	-	+	-	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+	-	-	10	
Модель на основе G-сетей	[25]	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	+	13	
Симбиоз ЛА, К и логической моделей																					
Структурно-логический подход	[4]	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	15	

(как технического, так и организационно-технического). В столбце 19 при положительном итоге приведена ссылка на источник, содержащий описание среды.

Анализ таблицы позволяет сделать вывод о том, что, по мнению авторов, в наиболее полной мере максимальному количеству критериев отвечает предлагаемый ими структурно-логический подход.

Заключение

Технологический процесс в предметной области мониторинга функционирования РКТ и обработки и анализа измерительной информации в общем случае является нестационарным конечномерным нелинейным процессом с дискретным временем. В настоящий момент известно множество способов представления модели такого технологического процесса. Технологический процесс управляется по алгоритму, в данной предметной области — управляющему алгорит-

му. Модель процесса — инструмент описания алгоритма. Полностью адекватная предметной области модель в значительной степени уменьшает время создания управляющего алгоритма.

Материал статьи непосредственно предназначен для оценивания предложенного авторами структурно-логического подхода среди известных методов моделирования технологических процессов в рассматриваемой предметной области.

Для проведения квалитметрии подходов к моделированию технологических процессов разработана система, состоящая из 17 показателей, распределенных по пяти группам. Группы позволяют оценить подход:

- на применимость модели для передачи многоаспектной сложности технологических процессов;
- на способность модели учитывать ограничения различного рода на траекторию развития процесса;
- на пригодность метода моделирования для программно-алгоритмической реализации;

— на степень удобства использования подхода к моделированию с позиции оператора при автоматизированном синтезе модели технологического процесса;

— на промышленную применимость подхода к моделированию.

Результаты системного анализа рассмотренных показателей позволили выбрать в качестве наиболее пригодного структурно-логический подход.

Материал может быть использован для:

— проведения квалиметрии разрабатываемого подхода к моделированию технологических процессов;

— обоснования направлений информационного поиска практических примеров внедрения специального программного обеспечения мониторинга технологических процессов в предметной области.

Литература

1. **Игошин В. И.** Математическая логика и теория алгоритмов. 2-е изд. — М.: Академия, 2008. — 448 с.
2. **Шмелев В. В., Охтилев М. Ю.** Сравнительный анализ структурно-логического подхода к моделированию технологических процессов функционирования ракетно-космической техники // Информационно-управляющие системы. 2016. № 5. С. 35–44. doi:10.15217/issn1684-8853.2016.5.35
3. **Шмелев В. В., Мануйлов Ю. С.** Применение модифицированных сетей Петри к моделированию процесса послеполетного анализа телеметрической информации // Тр. МАИ. 2015. № 6(84). <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=63140> (дата обращения: 10.07.2016).
4. **Шмелев В. В.** Модели технологических процессов функционирования космических средств // Авиа-космическое приборостроение. 2015. № 4. С. 78–93.
5. **Шмелев В. В.** Решение оптимизационной задачи на сетевой модели технологического процесса // Тр. МАИ. 2016. № 4(88). <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=70696>. (дата обращения: 10.07.2016).
6. **Соколов Б. В., Юсупов Р. М.** Концептуальные и методические основы квалиметрии моделей и полимодельных комплексов//Тр. СПИИРАН. 2004. Вып. 2. Т. 1. С. 10–35.
7. ГОСТ Р ИСО/МЭК 9126-93. Информационная технология. Оценка программной продукции. Характеристики качества и руководства по их применению. — М.: Изд-во стандартов, 2004. — 12 с.
8. ГОСТ 28195-89. Оценка качества программных средств. Общие положения. — М.: Изд-во стандартов, 2001. — 31 с.
9. **Майданович О. В.** и др. Теория и практика построения автоматизированных систем мониторинга технического состояния космических средств/ О. В. Майданович, В. А. Каргин, В. В. Мышко, М. Ю. Охтилев, Б. В. Соколов/ под ред. О. В. Майдановича: монография. — СПб.: ВКА им. А. Ф. Можайского, 2011. — 219 с.
10. **Мануйлов Ю. С., Павлов А. Н., Новиков Е. А.** Системный анализ и организация автоматизированного управления космическими аппаратами/под общ. ред. Ю. С. Мануйлова. — СПб.: ВКА им. А. Ф. Можайского, 2010. — 266 с.
11. **Мануйлов Ю. С., Птушкин А. И., Стародубов В. А.** Методологические основы применения гибких стратегий управления космическими аппаратами. — М.: МО РФ, 2005. — 102 с.
12. **Лескин А. А., Мальцев П. А., Спиридонов А. М.** Сети Петри в моделировании и управлении: монография. — Л.: Наука, 1989. — 133 с.
13. **Куперштейн В. И.** Microsoft Project 2013 в управлении проектами. — СПб.: БХВ-Петербург, 2014. — 432 с.
14. **Плотников А. М.** и др. Комплексное моделирование сложных объектов: основные особенности и примеры практической реализации/ А. М. Плотников, С. А. Потрясаев, Б. В. Соколов, Р. М. Юсупов // Имитационное моделирование. Теория и практика: тр. Седьмой Всерос. науч.-практ. конф. ИММОД-2015, Москва, 21–23 октября 2015 г. / Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН; под общ. ред. С. Н. Васильева, Р. М. Юсупова. Т. 1: Пленарные доклады. — М.: ИПУ РАН, 2015. С. 58–81.
15. **Павлов А. Н.** Модели и методы планирования реконфигурации сложных объектов с перестраиваемой структурой: дис. ... д-ра техн. наук. — СПб.: ГУАП, 2014. — 381 с.
16. **Мелихов А. Н.** Ориентированные графы и конечные автоматы. — М.: Наука, 1971. — 416 с.
17. **Юдицкий С. А.** Моделирование динамики многоагентных триадных сетей. — М.: СИНТЕГ, 2012. — 112 с.
18. **Юдицкий С. А.** Триадно-сетевые дорожные карты развития систем // Управление большими системами. 2013. Вып. 42. С. 55–74.
19. **Дмитриев А. К., Кравченко И. Д.** Модель процесса диагностирования технического объекта при использовании непрерывных диагностических признаков // Изв. вузов. Приборостроение. 1994. Т. 37. № 11–12. С. 3–9.
20. Системы сбора и обработки измерительной информации. www.nicetu.spb.ru/reshenja-i-producty/cistemy-sbora-i-obrabotki-izmeritelnoi-informacii. (дата обращения: 10.07.2016).
21. **Мальцев В. Б.** Анализ состояния технических систем. — М.: МО РФ, 1993. — 181 с.
22. **Зайцев Д. А., Шмелева Т. Р.** Моделирование телекоммуникационных систем в CPN Tools. — Одесса: ОНАС им. А. С. Попова, 2009. — 72 с.

23. Colored Petri Nets and CPN Tools. <http://cpntools.org/download>. (дата обращения: 10.07.2016).

24. Рышков Ю. П., Охтилев М. Ю., Богомолов С. Е. Актуальные вопросы автоматизированной обработки и анализа информационных процессов. — М.: МО РФ, 1992. — 140 с.

25. Охтилев М. Ю. Основы теории автоматизированного анализа измерительной информации в реальном времени. Синтез системы анализа: монография. — СПб.: ВКА им. А. Ф. Можайского, 1999. — 162 с.

UDC 681.518.3

doi:10.15217/issn1684-8853.2016.6.34

System of Rocket and Space Technology Functioning Model Quality Indicators

Shmelev V. V.^a, PhD, Tech., Doctoral Candidate, valja1978@yandex.ru

Okhtilev M. Yu.^b, Dr. Sc., Tech., Professor, oxt@mail.ru

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

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

Introduction: A technological process in the domain of monitoring the functioning of rocket and space technology and processing/analysis of the measurement data is generally a time-dependent nonlinear finite process with discrete time. Currently, there are many ways to represent a model of such a process. A process is controlled by an algorithm; in the given domain it is a control algorithm. The process model is a tool for describing the algorithm. A model which is fully adequate to the domain substantially reduces the time necessary to develop the control algorithm. **Purpose:** We develop indicators for the comparison of representatives of the known approaches to technological process modeling in the given domain. We study practical implementations of these approaches, identify their pros and cons, and determine the most suitable one. **Results:** In total, there are 17 indicators in 5 groups. The first group allows you to estimate whether an approach is suitable for transmitting multidimensional complexity of the processes. The second group is about the ability to take into account the constraints on the trajectory of the process development. The third one is about the suitability for software and algorithmic implementation. The fourth one is about the operator's convenience during the automated synthesis of a process model. Finally, the fifth group checks the industrial applicability. The criteria have been tested on the approaches widely used for monitoring and control of operational processes in launch vehicles and spacecrafts. Among the approaches under consideration, the structural and logical approach based on the combination of the complex, logical-algebraic and logical approaches has been determined as the most suitable one. **Practical relevance:** The obtained results can be used to provide an applied nature of the quality control process model used in the domain, and to support the directions of search for practical examples of introducing special software for monitoring technological processes in the domain.

Keywords — Rocket and Space Technology, Modeling of Technological Processes, Qualimetry Models, Structural and Logical Approach.

References

- Igoshin V. I. *Matematicheskaiia logika i teoriia algoritmov* [Mathematical Logic and Theory of Algorithms]. Moscow, Akademiia Publ., 2008. 448 p. (In Russian).
- Shmelev V. V., Okhtilev M. Y. Comparative Analysis of Structural and Logical Approach to the Modeling of Processes of Functioning of Rocket and Space Technology. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2016, no. 5, pp. 35–44 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2016.5.35
- Shmelev V. V., Manuilov Iu. S. Application of Modified Petri Nets to Modeling Processes Post-Flight Analysis of Telemetry Data. *Trudy MAI* [Proceedings of the Moscow Aviation Institute], 2015, no. 6(84). Available at: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=63140> (accessed 10 July 2016) (In Russian).
- Shmelev V. V. Models of Processes of Functioning of Space Assets. *Aviakosmicheskoe priboroostroenie* [Aerospace Instrumentation], 2015, no. 4, pp. 78–93 (In Russian).
- Shmelev V. V. The Solution of the Optimization Problem on the Network Model of the Process. *Trudy MAI* [Proceedings of the Moscow Aviation Institute], 2016, no. 4(88). Available at: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=70696>. (accessed 10 July 2016) (In Russian).
- Sokolov B. V., Yusupov R. M. The Conceptual and Methodological Basis of Quality Control Models and Multiple-Complexes. *Trudy SPIIRAN* [SPIIRAS Proceedings], 2004, iss. 2, vol. 1, pp. 10–35 (In Russian).
- State Standard ISO 9126-93. Information Technology. Evaluation of Software Products. Characteristics and Quality of their Application Management. Moscow, Standartinform Publ., 2004. 12 p. (In Russian).
- State Standard 28195-89. Evaluation of Software Quality. General Provisions. Moscow, Standartinform Publ., 2001. 31 p. (In Russian).
- Maidanovich O. V., Kargin V. A., Myshko V. V., Okhtilev M. Yu., Sokolov B. V. *Teoriia i praktika postroeniia avtomati zirovannykh sistem monitoringa tekhnicheskogo sostoianiia kosmicheskikh sredstv* [The Theory and Practice of Construction of Automated Systems for Monitoring the Technical Condition of Space Vehicles]. Saint-Petersburg, A. F. Mozhaiskii Military Space Academy Publ., 2011. 219 p. (In Russian).
- Manuilov Iu. S., Pavlov A. N., Novikov E. A. *Sistemnyi analiz i organizatsiia avtomatizirovannogo upravleniia kosmicheskimi apparatami* [Systems Analysis and Organization of Automated Spacecraft Control]. Saint-Petersburg, A. F. Mozhaiskii Military Space Academy Publ., 2010. 266 p. (In Russian).
- Manuilov Iu. S., Ptushkin A. I., Starodubov V. A. *Metodologicheskie osnovy primeneniia gibkikh strategii upravleniia kosmicheskimi apparatami* [Methodological Basis for the Use of Flexible Spacecraft Control Strategies]. Ministerstvo oborony Rossiiskoi Federatsii Publ., 2005. 102 p. (In Russian).
- Leskin A. A., Mal'tsev P. A., Spiridonov A. M. *Seti Petri v modelirovanii i upravlenii* [The Petri Nets in Modeling and Management]. Leningrad, Nauka Publ., 1989. 133 p. (In Russian).
- Kupershtein V. I. *Microsoft Project 2013 v upravlenii proektami* [Microsoft Project 2013 Project Management]. Saint-Petersburg, BHV-Peterburg Publ., 2014. 432 p. (In Russian).
- Plotnikov A. M., Potriasaev S. A., Sokolov B. V., Yusupov R. M. Complex Modeling of Complex Objects: Main Features and Examples of Practical Implementation. *Sed'maia Vserossiiskaia nauchno-prakticheskaiia konferentsiia "Imitatsionnoe modelirovanie. Teoriia i praktika" (IMMOD-2015), tom 1* [Proc. of Seventh All-Russia Scientific-Practical Conference "Simulation. Theory and Practice", vol. 1]. Moscow, 2015, pp. 58–81 (In Russian).
- Pavlov A. N. *Modeli i metody planirovaniia rekonfiguratsii slozhnykh ob'ektov s perestraivaemoi strukturoi*. Dis. doct. tech. nauk [Models and Methods of Planning Reconfiguration

- of Complex Objects with Reconfigurable Structure. Dr. tech. sci. diss.]. Saint-Petersburg, GUAP Publ., 2014. 381 p. (In Russian).
16. Melikhov A. N. *Orientirovannye grafy i konechnye avtomaty* [Directed Graphs and Finite State Machines]. Moscow, Nauka Publ., 1971. 416 p. (In Russian).
 17. Iuditskii S. A. *Modelirovanie dinamiki mnogoagentnykh triadnykh setei* [Modeling the Dynamics of Multi-Agent Network Triad]. Moscow, SINTEG Publ., 2012. 112 p. (In Russian).
 18. Iuditskii S. A. Triad-Network Systems Development Roadmaps. *Upravlenie bol'shimi sistemami* [Managing Large Systems], 2013, vol. 42, pp. 55–74 (In Russian).
 19. Dmitriev A. K., Kravchenko I. D. The Technical Object Process Model Diagnosis Using Continuous Diagnostic Features. *Izvestiia vuzov. Priborostroenie*, 1994, vol. 37, no. 11–12, pp. 3–9 (In Russian).
 20. *Cistemy sbora i obrabotki izmeritel'noj informacii* [Systems for Collecting and Processing the Measurement Information]. Available at: www.nicetu.spb.ru/reshenja-i-producty/cistemy-sbora-i-obrabotki-izmeritelnoi-informacii (accessed 10 July 2016) (In Russian).
 21. Mal'tsev V. B. *Analiz sostoiianiia tekhnicheskikh sistem* [Analysis of the Technical Systems]. Moscow, Ministerstvo oborony Rossiiskoi Federatsii Publ., 1993. 181 p. (In Russian).
 22. Zaitsev D. A., Shmeleva T. R. *Modelirovanie telekommunikatsionnykh sistem v CPN Tools* [Modeling of Telecommunication Systems in the CPN Tools]. Odessa, ONAS im. A. S. Popova Publ., 2009. 72 p. (In Russian).
 23. *Colored Petri Nets and CPN Tools*. Available at: <http://cpn-tools.org/> (accessed 10 July 2016).
 24. Ryshkov Iu. P., Okhtilev M. Yu., Bogomolov S. E. *Aktual'nye voprosy avtomatizirovannoi obrabotki i analiza informatsionnykh protsessov* [Topical Issues of the Automated Processing and Analysis of Information Processes]. Moscow, Ministerstvo oborony Rossiiskoi Federatsii Publ., 1992. 140 p. (In Russian).
 25. Okhtilev M. Yu. *Osnovy teorii avtomatizirovannogo analiza izmeritel'noi informatsii v real'nom vremeni. Sintez sistemy analiza* [Basic Theory of the Automated Analysis of the Measuring Data in Real Time. Synthesis Analysis]. Saint-Petersburg, A. F. Mozhaiskii Military Space Academy Publ., 1999. 162 p. (In Russian).
-

ПАМЯТКА ДЛЯ АВТОРОВ

Поступающие в редакцию статьи проходят обязательное рецензирование.

При наличии положительной рецензии статья рассматривается редакционной коллегией. Принятая в печать статья направляется автору для согласования редакторских правок. После согласования автор представляет в редакцию окончательный вариант текста статьи.

Процедуры согласования текста статьи могут осуществляться как непосредственно в редакции, так и по e-mail (ius.spb@gmail.com).

При отклонении статьи редакция представляет автору мотивированное заключение и рецензию, при необходимости доработать статью — рецензию. Рукописи не возвращаются.

Редакция журнала напоминает, что ответственность за достоверность и точность рекламных материалов несут рекламодатели.

ТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ С БЕСКОНЕЧНЫМ СЛОВАРЕМ

С. Н. Карпович^{а, 1}, руководитель направления поисковой оптимизации

^аRambler&Co интернет холдинг, Москва, РФ

Постановка проблемы: в связи с постоянным ростом Интернета, увеличением количества новостей, сообщений в электронной почте, постов в блогах растет потребность в алгоритмах для автоматического анализа текстовых данных. Одним из перспективных направлений машинного обучения и анализа текстов на естественном языке являются алгоритмы тематического моделирования. Большинство методов тематического моделирования рассматривают данные в статичном виде, с конечным словарем, но на практике необходимы методы, позволяющие работать с пополняемым словарем. Каждый год появляются новые слова, какие-то слова выходят из обихода, поэтому вопрос пополнения словаря особенно актуален для онлайн тематических моделей. **Цель:** разработка подхода определения тематического вектора нового слова с использованием произведения Адамара тематических векторов документов, где это слово встретилось, который будет альтернативным подходом к использованию распределения Дирихле или процесса Дирихле. **Результаты:** исследования показали, что сумма векторов тем документов, где встретилось новое слово, дает неверное представление о тематической принадлежности нового слова. При этом для определения тематики нового слова по тематикам документов, где это слово встретилось, эффективнее использовать произведение Адамара. В результате перемножения векторов тем документов получаем тематический вектор нового слова с наибольшими значениями вероятностей у нескольких тематик, значение слабо выраженных тематик либо стремится к нулю, либо обнуляется. **Практическая значимость:** использование предложенного алгоритма позволяет бесконечно увеличивать словарь онлайн тематической модели, а следовательно, учитывать новые и старые слова.

Ключевые слова — тематическое моделирование, обработка текста на естественном языке, машинное обучение.

Введение

Тематическое моделирование — одно из современных направлений машинного обучения при анализе текстов. Вероятностная тематическая модель коллекции текстовых документов определяет, к каким темам и с какой вероятностью относится каждый документ, а также вероятности слов, составляющих каждую тему. Задача тематического моделирования рассматривается как задача одновременной кластеризации слов и документов по одному и тому же множеству кластеров, называемых темами. На выходе тематической модели (ТМ) каждому документу и слову определяется тематический вектор, состоящий из оценок степени принадлежности данного документа или слова каждой из тем. Размерность вектора равна числу тем. Алгоритмы тематического моделирования используются в исследованиях, применяются в задачах кластеризации, используются в информационном поиске.

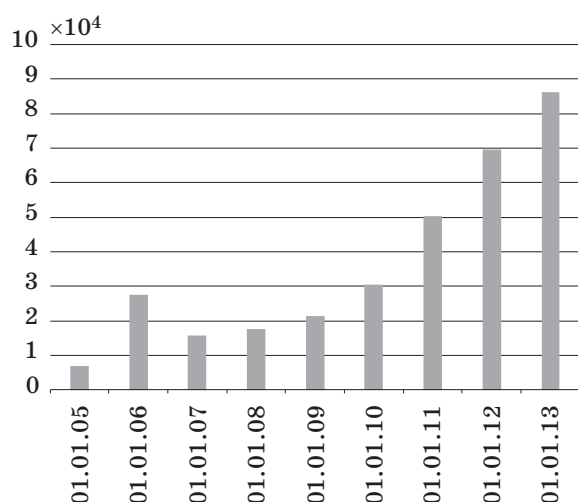
В работах [1, 2] представлены базовые алгоритмы тематического моделирования — PLSI (Probabilistic Latent Semantic Indexing) и LDA (Latent Dirichlet Allocation), которые описывают построение ТМ с конечным набором документов, конечным размером словаря модели. В реальных задачах анализа текстов на естественном

языке все чаще возникает потребность в онлайн анализе динамической ТМ, определении тематической принадлежности новых документов, определении тематики новых слов. Под «новым словом» в данной работе подразумевается слово, отсутствующее в словаре ТМ. Под «новым документом» подразумевается документ, который не участвовал в построении ТМ.

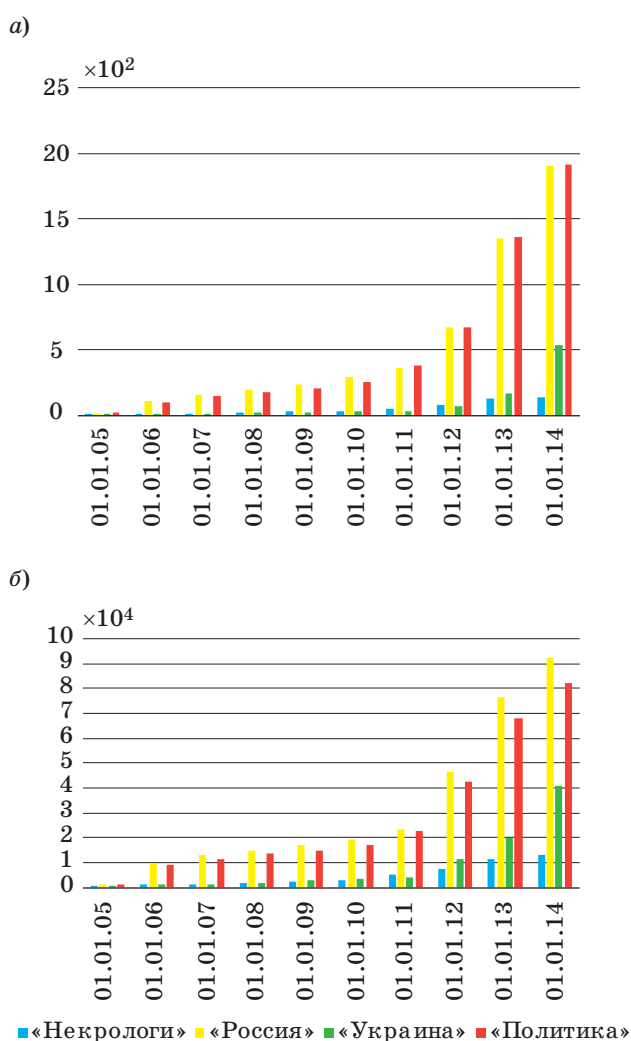
С каждым годом словарный состав, используемый в повседневной жизни любого человека, меняется. Изменяются частотные характеристики употребления слов и выражений, устаревающие выходят из обихода, появляются новые, прочно занимая свое место в нашей жизни. Действительно, исследуя данные корпуса текстов SCTM-ru [3], подсчитаем уникальные слова в документах корпуса за каждый год (рис. 1). Если снижение количества уникальных слов в 2007 г. могло быть связано с особенностью наполнения Викиновостей в это время, то, начиная с 2009 г., количество уникальных слов стремительно растет.

Тематическая модель, построенная на текстах до 2010 г., не будет содержать информацию о половине слов ТМ 2013 г., так как словарь новостей в 2013 г. в два раза больше словаря новостей 2010 г. Можно заметить, что рост количества уникальных слов произошел вследствие увеличения количества документов в Викиновостях. На рис. 2, а представлено количество документов в тематиках «Некрологи», «Россия», «Украина», «Политика». Хорошо заметен рост

¹ Научный руководитель — профессор, доктор технических наук, заведующий лабораторией интегрированных систем автоматизации СПИИРАН А. В. Смирнов.



■ **Рис. 1.** Количество уникальных слов в корпусе SCTM-ru, 2005–2013 гг.



■ **Рис. 2.** Количество документов (а) и уникальных слов (б) по тематикам в корпусе SCTM-ru, 2005–2014 гг.

количества новостей по тематикам «Россия» и «Политика». На рис. 2, б представлено количество уникальных слов в этих же тематиках.

Из графиков видно, что количество новых документов в тематиках «Россия» и «Политика» от года к году росло равномерно, при этом словарный состав тематики «Россия» рос быстрее, и по количеству уникальных слов тематика «Россия» опережает тематику «Политика». Тематика «Украина», в четыре раза уступающая лидерам по количеству документов, по своему словарному составу лишь в два раза меньше этих же тематик лидеров.

Цель данной работы — выбрать подход к определению тематики нового слова в ТМ по тематическому вектору документов, где это слово встретилось. Разработать метод расчета тематического вектора для новых слов. Предложить алгоритм расширения словаря ТМ.

Обзор существующих методов расширения словаря тематической модели

В работах [4–7] описаны подходы к построению динамических ТМ с фиксированным словарем. Эти ТМ позволяют проследить изменение тематики во времени, но не позволяют оценить изменение словарного состава модели.

В работе [8] описан алгоритм создания онлайн ТМ с бесконечным словарем. Основное отличие модели заключается в том, что мультиномиальное распределение берется из бесконечного процесса Дирихле по всем возможным словам, вместо конечного распределения Дирихле. В словарь добавляются новые слова с каждой итерацией добавления новых документов в ТМ, но количество слов в словаре ограничено заданным значением, поэтому словарь является усеченным упорядоченным множеством вероятностного распределения слов. Таким образом, словарный состав ТМ не меняется в размере, но изменяется по своему составу по мере добавления новых документов.

Алгоритм построения онлайн ТМ с изменяемым словарем рассмотрен в работе [9]. Время в модели дискретно, документы, поступающие в ТМ, разбиты на временные отрезки, временной срез может быть равен часу, дню, месяцу или году. Вводится понятие «окна», которому соответствует набор документов из нескольких временных срезов. В модели документы обрабатываются итеративно в рамках одного «окна». Одно из ключевых отличий этого подхода от онлайн LDA [7] является передача параметров от ранее построенной модели в новую. Второе отличие — это динамически изменяющийся словарь ТМ, где тематические векторы слов, которые при-

существовали в предыдущем «окне», рассчитываются по данным старой модели, а тематические векторы новых слов берутся из равномерного распределения Дирихле. Новые слова, встретившиеся более 10 раз, добавляются в модель, а старые слова, встретившиеся менее 10 раз в «окне», удаляются из ТМ. Отсутствует ограничение на размер словаря ТМ, поэтому он может изменяться по размеру и составу в ходе добавления новых документов.

Таким образом, существуют алгоритмы тематического моделирования с изменяемым словарем, в которых тематический вектор нового слова берется из равномерного распределения Дирихле либо из процесса Дирихле, но не предложено подходов в определении тематики нового слова по тематическим векторам документов, где это слово встретилось.

Исследование темы нового слова

В качестве коллекции документов для исследования возьмем уже упоминавшийся корпус SCTM-ru, созданный специально для тестирования алгоритмов тематического моделирования. Источником данных корпуса является сайт «Русские Викиновости». Корпус SCTM-ru состоит из 7000 документов. События, описанные в документах, происходят с ноября 2005 г. по июнь 2014 г. Словарный состав корпуса — 150 600 уникальных словоформ, 59 000 уникальных лемм. Для проведения исследования разделим корпус на две части, над первой частью построим ТМ, вторую будем использовать в качестве объекта исследования. Новости с 2005-го до конца 2012 г. возьмем в качестве данных для обучения. Применим алгоритм multi-label PLSI (ml-PLSI) [10] для обучения ТМ, который позволяет предсказывать тематическую принадлежность новых документов. Тестовый набор данных формируется из новостей за 2013 г.

По определению тематического моделирования, задача построения ТМ рассматривается как задача одновременной кластеризации слов и документов по одному и тому же множеству кластеров, называемых темами, поэтому размерность тематических векторов документов и слов одинакова. Алгоритм ml-PLSI определяет вектор тем нового документа по словарному составу этого документа: новые слова, которые впервые встретились в ТМ, никак не влияют на определение тематики нового документа. Резонно предположить, что тематика нового слова, впервые появившегося в ТМ, каким-то образом связана с тематикой документа, где это слово встретилось. Для того чтобы определить эту связь, возьмем набор новых документов и определим их тематическую принадлежность. Для определения

тематики нового слова нужны тематические векторы документов, где эти слова встретились.

Слова, редко встречающиеся в коллекции документов, не значимы для ТМ. Чем больше документов содержат новое слово, тем точнее определяется тематическая принадлежность этого слова по векторам тем документов. Положим важными для ТМ те слова, которые встретились более чем в пяти документах. Таких новых слов оказалось 352. Например, слово «Кипру» встретилось в 14 документах, слово «олигарха» — в 11, «Царнаева» — в 10, «Тамерлан» — в девяти, «Анастасиадис» — в семи, «метеорита» — в шести, «вальц» — в пяти.

Для определения тематики нового слова «вальц» подсчитаем сумму тематических векторов документов, где это слово встретилось:

$$P_{new}(w|t) = \sum_{i=1}^n P_i(d|t),$$

где $P_{new}(w|t)$ — тематический вектор нового слова; $P_i(d|t)$ — тематический вектор документа, где встретилось новое слово; n — количество документов, где встретилось новое слово.

Для визуального представления отнесения нового слова ко всем тематикам модели отобразим нормированный вектор на графике. Результат представлен на рис. 3, где по оси абсцисс — темы, по оси ординат — вероятность отнесения нового слова к теме. На рис. 4 показаны пять наиболее значимых тем, к которым относится слово «вальц».

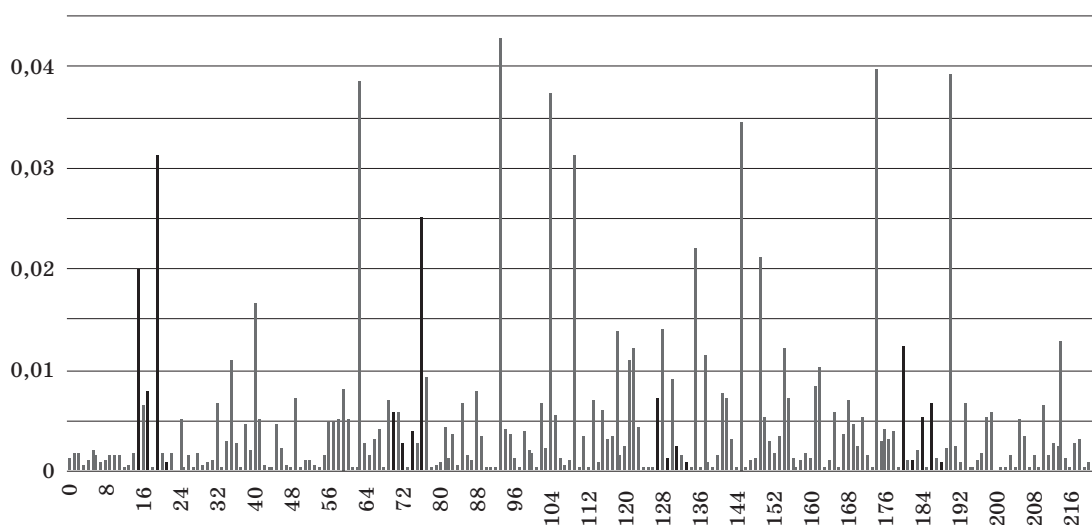
После нормирования слово «вальц» с вероятностью более 0,001 относится к 149 темам (см. рис. 3). Сумма тематических векторов может определять тематический вектор нового слова, но в этом случае новое слово относится к большому количеству тем, что зачастую не так.

Используем произведение тематических векторов документов, где встретилось новое слово, а именно покомпонентное произведение Адамара [11]:

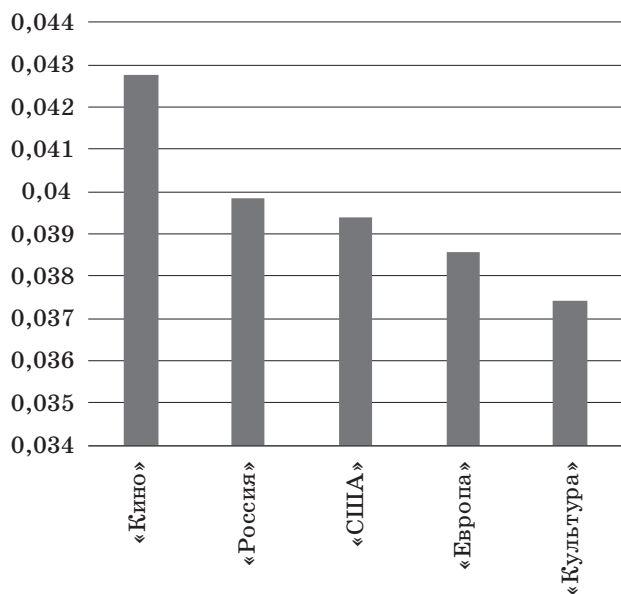
$$P_{new}(w|t) = P_{i=1}(d|t) \cdot P_{i+1}(d|t) \cdot \dots \cdot P_n(d|t).$$

На рис. 5 представлен график нормированного распределения вероятностей тем для слова «вальц», полученный произведением Адамара тематических векторов документов, где это слово встретилось, а на рис. 6 — наиболее вероятные темы для этого слова.

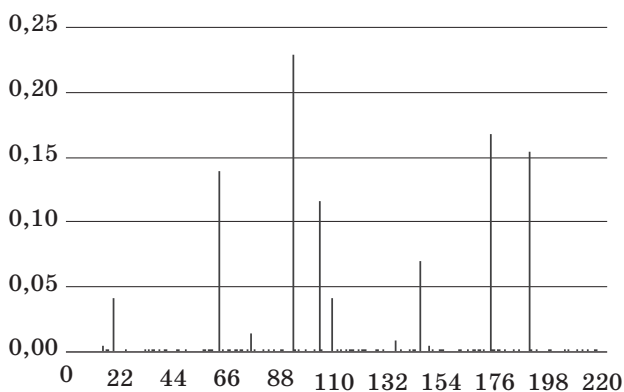
Рассмотрим подробнее результаты суммы и произведения Адамара векторов на примере. Предположим, что в ТМ — три темы и три документа с новым словом. Векторы тем новых



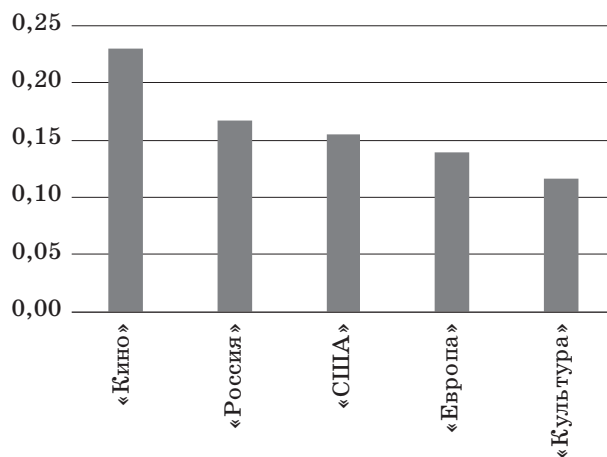
■ Рис. 3. Распределение вероятностей тем для слова «вальц»



■ Рис. 4. Значимые темы от суммы вероятностей тем для слова «вальц»



■ Рис. 5. Распределение вероятностей тем для слова «вальц»



■ Рис. 6. Значимые темы от произведения Адамара вероятностей тем для слова «вальц»

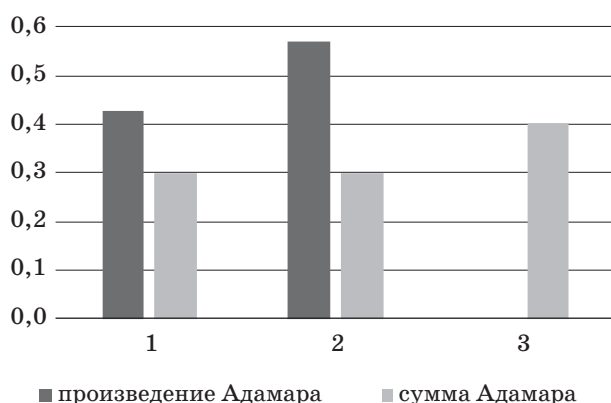
слов равны $\{0,5 \ 0,5 \ 0,0\}$, $\{0,3 \ 0,2 \ 0,5\}$, $\{0,1 \ 0,2 \ 0,7\}$.
Сумма векторов

$$\begin{pmatrix} 0,5 \\ 0,5 \\ 0,0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0,3 \\ 0,2 \\ 0,5 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0,1 \\ 0,2 \\ 0,7 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,9 \\ 0,9 \\ 1,2 \end{pmatrix}.$$

Результат произведения Адамара этих векторов

$$\begin{pmatrix} 0,5 \\ 0,5 \\ 0,0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0,3 \\ 0,2 \\ 0,5 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0,1 \\ 0,2 \\ 0,7 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,015 \\ 0,02 \\ 0,0 \end{pmatrix}.$$

Нормированные векторы вероятностей тем нового слова представлены на рис. 7 для суммы и произведения Адамара векторов тем документов, где это слово встретилось.



■ Рис. 7. Пример векторов произведения Адамара и суммы для трех тем

Суммы вероятностей для первой и второй тем равны, хотя значения вероятностных оценок в документах для этих тем сильно отличаются. Вывод: при суммировании векторов тем теряется значимая для определения тематики нового слова информация. По сумме векторов тем новое слово, с наибольшей вероятностью, относится к третьей теме, но третий документ не относится к третьей теме, следовательно, и слово, которое в нем встретилось, не относится к этой теме. Сумма вероятностей ошибочно связывает новое слово с одной из тем, а произведение Адамара обнуляет вероятность для этой темы. Таким образом, применение произведения Адамара для определения тематики нового слова точнее отражает тематическую принадлежность этого слова, так как обнуляет значение вероятности для непересекающихся векторов тем.

В подходе с использованием произведения Адамара существует вероятность появления нулевых векторов из-за наличия ошибочно использованных слов в не соответствующих этим словам документах. Пример обнуления значений тематического вектора:

$$\begin{pmatrix} 0,1 \\ 0,9 \\ 0,0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0,0 \\ 0,0 \\ 1,0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,0 \\ 0,0 \\ 0,0 \end{pmatrix}.$$

На тестовых данных можно подсчитать количество нулевых векторов, полученных от произведения Адамара для случая, когда учитываем все новые слова, встретившиеся в двух и более документах. Таких слов 2193. Нулевых векторов нет. Следовательно, в корпусе SCTM-ru нет ошибок, связанных с некорректным использованием слова в документе, и произведение Адамара может быть выбрано как лучший способ определения тематического вектора для нового слова.

Прототип метода определения тематики нового слова реализован с помощью дистрибутива Anaconda, язык разработки Python, программные библиотеки для обработки и анализа данных — pandas, numpy, scikit-learn. Сначала, используя алгоритм ml-PLSI, создаем ТМ на данных для обучения. Затем последовательно обрабатываем все новости из тестовых данных. Запоминаем каждое новое слово и тематический вектор документа, где это слово встретилось. Для новых слов рассчитываем тематический вектор через сумму и через произведение Адамара тематических векторов документов, где это слово встретилось.

Метод определения тематики нового слова. Алгоритм расширения словаря тематической модели

Как показал эксперимент на корпусе SCTM-ru, наиболее удобный способ определения тематики нового слова — это произведение Адамара тематических векторов документов, где это новое слово встретилось.

Для расширения словаря ТМ предлагается использовать следующий алгоритм:

Вход: ТМ, набор новых документов d_{new} .

Выход: ТМ с бесконечным словарем.

1. Выбираем группу новых документов, например, документы за один год или иное значимое количество новых документов.

2. Для всех новых документов d_{new} группы

$$P(d|t) = \sum_{w \in d} P(w|t).$$

3. Для всех новых слов w_{new} в группе новых документов

$$P_{new}(w|t) = P_{i=1}(d|t) \cdot P_{i+1}(d|t) \cdot \dots \cdot P_n(d|t).$$

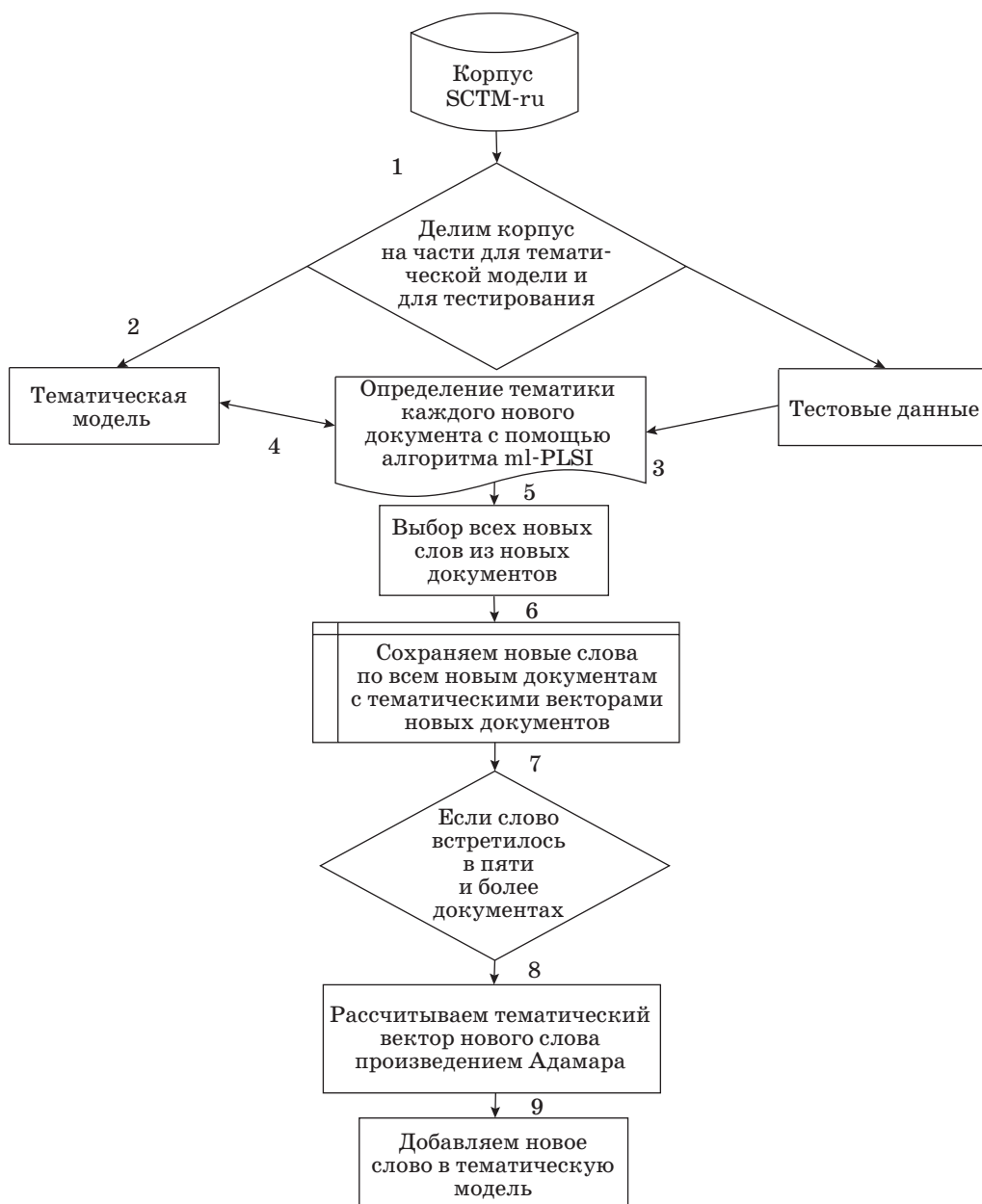
4. Обновляем матрицы «слово-документ», «документ-тема», «слово-тема» для всех документов группы:

а) добавляем в матрицу «документ-тема» тематический вектор нового документа;

б) добавляем в матрицу «слово-документ» вектор с количеством слов в документе;

в) добавляем в матрицу «слово-тема» тематический вектор нового слова.

Схема метода представлена на рис. 8. Шаги 1–6 проходим для всех документов в тестовом множестве. Учитывая, что слова, редко встречающиеся в исследуемой коллекции документов, не значимы для ТМ, необходимо определить минимальное количество документов, где встретилось новое слово. В текущей работе зададим пороговое значение в пять документов. Для слов, которые равны или превышают пороговое значение,



■ Рис. 8. Схема метода определения тематики нового слова и добавления нового слова в ТМ

рассчитываем тематический вектор по произведению Адамара. Затем добавим новое слово и новые документы в ранее построенную ТМ.

Заключение

В результате проведенного исследования представлены методы определения тематической принадлежности нового слова в ТМ с использованием суммы и произведения Адамара тематических векторов документов, где это слово встретилось. Разработан прототип системы, использующий оба метода для определения тематики нового слова. Проведен анализ изменения размера словаря

корпуса SCTM-ru в зависимости от времени описанных событий. Предложен алгоритм построения ТМ с бесконечным словарем, который позволяет дополнять словарь ТМ по мере добавления новых документов.

Проведенный анализ демонстрирует перспективность методов тематического моделирования. Предложено решение по важному вопросу тематического моделирования — определение тематики нового слова.

Статистическое исследование корпуса и программная часть метода определения тематики нового слова доступны на <<https://github.com/cimsweb/TM-New-Word/>>.

Литература

- Hoffman T. Probabilistic Latent Semantic Indexing// Proc. of the Twenty-Second Annual Intern. SIGIR Conf. on Research and Development in Information Retrieval. ACM. 1999. P. 50–57. doi:10.1145/312624.312649
- Blei D. M., Ng A. Y., Jordan M. I. Latent Dirichlet Allocation// Journal of Machine Learning Research. MIT Press. Jan. 2003. Vol. 3. P. 993–1022.
- Карпович С. Н. Русскоязычный корпус текстов SCTM-RU для построения тематических моделей // Тр. СПИИРАН. 2015. Т. 2. № 39. С. 123–142. doi:10.15622/sp.39.8
- Blei D. M., Lafferty J. D. Dynamic Topic Models// Proc. of the 23rd Intern. Conf. on Machine Learning. ACM. 2006. P. 113–120. doi:10.1145/1143844.1143859
- Nallapati R. M. et al. Multiscale Topic Tomography / R. M. Nallapati, S. Ditime, J. D. Lafferty, K. Ung // Proc. of the 13th ACM SIGKDD Intern. Conf. on Knowledge Discovery and Data Mining. ACM. 2007. P. 520–529. doi:10.1145/1281192.1281249
- Wang C., Blei D., Heckerman D. Continuous Time Dynamic Topic Models: preprint arXiv:1206.3298.2012.
- Hoffman M., Bach F. R., Blei D. M. Online Learning for Latent Dirichlet Allocation// Advances in Neural Information Processing Systems. 2010. P. 856–864.
- Zhai K., Boyd-Graber J. L. Online Latent Dirichlet Allocation with Infinite Vocabulary// ICML (1). 2013. Vol. 28. P. 561–569.
- Lau J. H., Collier N., Baldwin T. On-line Trend Analysis with Topic Models: \# twitter Trends Detection Topic Model Online// COLING. 2012. P. 1519–1534.
- Карпович С. Н. Многозначная классификация текстовых документов с использованием вероятностного тематического моделирования ml-PLSI // Тр. СПИИРАН. 2016. Т. 4. № 47. С. 92–104. doi:10.15622/sp.47.5
- Horn R. A. The Hadamard Product// Proc. Symp. Appl. Math. 1990. Vol. 40. P. 87–169.

UDC 004.912

doi:10.15217/issn1684-8853.2016.6.43

Topic Model with an Infinite Vocabulary

Karpovich S. N.^a, Head of Search Engine Optimization, cims@yandex.ru^aRambler Internet Holding LLC, 9, Varshvskoe Sh., 117105, Moscow, Russian Federation

Introduction: Due to the continuous growth of the internet, increasing amount of news, email messages, posts in blogs, etc., Natural Language Processing systems are in high demand. A popular and promising direction in machine learning and natural language processing is developing topic model algorithms. Most topic model methods deal with static information and a limited vocabulary. In practice, however, we need tools to work with a refillable vocabulary. New words come out every year, some words become obsolete, so refillable vocabularies are especially important for Online Topic Models. **Purpose:** We develop an approach to determine the topical vector for a new word using the Hadamard product of the topical vectors of the documents where this word was found. This approach will be an alternative to the use of Dirichlet distribution or Dirichlet process. **Results:** The research has shown that a sum of topical vectors in the documents with a new word gives a wrong idea about the topic of this new word. At the same time, it is better to use Hadamard product to specify the topic of a new word by the topics of the documents. Multiplying entrywise the topical vectors of the documents with a new word cancels the topics which do not overlap, separating out common topics with similar meanings. Multiplying the topical vectors of the documents provides a topical vector for the new word with the highest probability values for several most important topics. The values of weakly expressed topics either approach zero or are reset to zero. **Practical relevance:** The use of the proposed algorithm can infinitely expand the online vocabulary of a topic model and, hence, consider both new and old words.

Keywords — Topic Model, Natural Language Processing, Machine Learning.

References

- Hoffman T. Probabilistic Latent Semantic Indexing. *Proceedings of the Twenty-Second Annual International SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval*, ACM, 1999, pp. 50–57. doi:10.1145/312624.312649
- Blei D. M., Ng A. Y., Jordan M. I. Latent Dirichlet Allocation. *Journal of Machine Learning Research*, MIT Press, Jan. 2003, vol. 3, pp. 993–1022.
- Karpovich S. N. The Russian Language Text Corpus for Testing Algorithms of Topic Model. *Trudy SPIIRAN* [SPIIRAS Proceedings], 2015, pp. 123–142 (In Russian). doi:10.15622/sp.39.8
- Blei D. M., Lafferty J. D. Dynamic Topic Models. *Proc. of the 23rd Intern. Conf. on Machine Learning*, ACM, 2006, pp. 113–120. doi:10.1145/1143844.1143859
- Nallapati R. M., Ditime S., Lafferty J. D., Ung K. Multiscale Topic Tomography. *Proc. of the 13th ACM SIGKDD Intern. Conf. on Knowledge Discovery and Data Mining*, ACM, 2007, pp. 520–529. doi:10.1145/1281192.1281249
- Wang C., Blei D. M., Heckerman D. *Continuous Time Dynamic Topic Models*. Preprint arXiv:1206.3298, 2012.
- Hoffman M., Bach F. R., Blei D. M. Online Learning for Latent Dirichlet Allocation. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2010, pp. 856–864.
- Zhai K., Boyd-Graber J. L. Online Latent Dirichlet Allocation with Infinite Vocabulary. *ICML (1)*, 2013, vol. 28, pp. 561–569.
- Lau J. H., Collier N., Baldwin T. On-line Trend Analysis with Topic Models: \# twitter Trends Detection Topic Model Online. *COLING*, 2012, pp. 1519–1534.
- Karpovich S. N. Multi-Label Classification of Text Documents using Probabilistic Topic Model ml-PLSI. *Trudy SPIIRAN* [SPIIRAS Proceedings], 2016, no. 47, pp. 92–104 (In Russian). doi:10.15622/sp.47.5
- Horn R. A. The Hadamard Product. *Proc. Symp. Appl. Math.*, 1990, vol. 40, pp. 87–169.

КООПЕРАТИВНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ АВТОМАТНЫХ ОБЪЕКТОВ

Ф. А. Новиков^а, доктор техн. наук, профессор

И. В. Афанасьева^{б, в}, ведущий инженер, аспирант

^аСанкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, РФ

^бСпециальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, РФ

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

Цель исследования: создание модели описания поведения, нацеленной на достижение более высоких показателей надежности и производительности при проектировании архитектуры и реализации реагирующих и распределенных систем по сравнению с традиционными методами. Побочной целью является создание удобного графического языка публикаций для описания параллельных алгоритмов и распределенных реагирующих систем. **Методы:** для описания поведения использованы диаграммы автомата (графы переходов состояний) унифицированного языка моделирования UML, расширенные специальными стереотипами, портами и интерфейсами. Описание предлагаемого графического языка проведено с помощью метамоделирования средствами диаграмм классов UML. **Результаты:** разработана модель поведения, использующая графы переходов состояний и относящаяся к парадигме автоматного программирования. Детально описаны свойства и преимущества предлагаемой модели в классе асинхронных распределенных реагирующих систем, а именно: доказана алгоритмическая полнота, определен наглядный графический язык, приведены демонстрационные примеры и указаны перспективы развития. **Практическая значимость:** представленная модель была успешно применена на практике при разработке специализированного программного обеспечения управления высокоточным научным оборудованием в наблюдательной астрономии, а также использована как высокоуровневое средство описания поведения в автоматном методе определения языков предметной области.

Ключевые слова — модель поведения, автоматное программирование, граф переходов состояний, унифицированный язык моделирования, диаграммы автомата, диаграммы классов, параллельное поведение, архитектура реагирующих систем.

Введение

В современных информационных технологиях и программировании господствует взгляд на программное обеспечение как на системы взаимодействующих программных объектов. Программный объект имеет состояние и поведение. Состояние определяется текущими значениями свойств объекта, а поведение задается методами объекта. При этом практически все сходятся в том, что *свойства* удобнее всего представлять парами «ключ — значение», и по этому вопросу нет разночтений. Для задания *поведения*, напротив, используется великое множество различных подходов, и это верный признак того, что среди известных подходов нет наилучшего во всех возможных случаях. Каждый способ описания поведения программных объектов имеет свои достоинства и свои недостатки, которые по-разному проявляются в различных контекстах.

Здесь мы представляем еще один способ описания поведения и соответствующий графический язык, которые имеют существенные преимущества при определенных условиях.

Предлагаемая модель возникла не на пустом месте. Уже более четверти века развивается *парадигма автоматного программирования* — подход к описанию поведения, основанный на явном выделении состояний. Несравненные заслуги

в развитии и продвижении этого подхода принадлежат профессору А. А. Шалыто. Автоматное программирование имеет целый ряд неоспоримых достоинств, отмеченных в работах [1–3] и в других источниках:

- простое и ясное математическое основание в форме теории автоматов;

- устойчивую традицию использования концепции состояний при описании поведения различных устройств во многих инженерных областях;

- возможность несложной, а потому эффективной программной реализации на любой платформе.

По нашему мнению, в настоящее время автоматное программирование является наиболее перспективной парадигмой создания программного обеспечения сложных технических устройств.

Многие авторы с успехом применяли автоматное программирование в различных областях и с различными целями, что вызвало к жизни разнообразие форм автоматного программирования. При этом, естественно, менялась нотация, семантика, прагматика и т. д. при неизменности центральной идеи явного выделения состояний. Разнообразие форм является достоинством парадигмы, если известно, в каких случаях и при каких условиях целесообразно применять ту или

иную форму. В противном случае разнообразие форм может сбивать с толку.

В данной статье мы ставим цель изложить теоретические основы и предложить развитую нотацию конкретной формы автоматного программирования для *асинхронных распределенных реагирующих систем* в рамках нашего опыта практического применения автоматного программирования [4, 5] и использования предлагаемого языка [6].

Действия и состояния

Прежде всего необходимо точно определить, что есть *поведение* и что есть *состояние* программного объекта. При определении поведения мы полагаем, что имеется некоторая базовая машина, обладающая способностью производить элементарные *действия*. Например, при определении поведения с помощью машины Тьюринга элементарными действиями являются смена состояний в управляющем устройстве машины, движения ленточной головки, запись и чтение символов на ленте [7]. Каждая конкретная фактически выполненная последовательность действий называется *протоколом* (или экземпляром выполнения, или вычислением). При этом последовательности действий в протоколах отнюдь не произвольны. Например, на каждом такте работы машины Тьюринга сначала читается текущий символ на ленте, затем записывается новый символ и меняется состояние, а потом уже производится движение головки. Конечное описание некоторого потенциально бесконечного подмножества множества протоколов называется *моделью поведения*, или просто *поведением* [8]. В настоящее время доминирующим классом таких описаний являются алгоритмы [9], поскольку все множество возможных выполнений любого алгоритма как раз образует некоторое множество протоколов. При этом нас интересует описание множеств таких протоколов, которые обладают определенными свойствами. Например, в случае машины Тьюринга нас интересуют только протоколы, которые начинаются, когда машина находится в начальном состоянии и на ленте записаны исходные данные, а заканчиваются, когда машина находится в заключительном состоянии. Таким образом, в первом приближении можно считать, что *поведение* — это описание некоторого множества протоколов выполнения. Первое приближение нуждается в трех существенных уточнениях.

Во-первых, заметим, что мы считали протоколы линейно упорядоченными множествами (последовательностями) только для простоты начального изложения. На самом деле действия при выполнении упорядочены частично. Например, в машине Тьюринга чтение символа с ленты обя-

зательно предшествует перемещению головки, но смену состояния и запись символа на ленту можно выполнять в любом порядке, т. е. параллельно. Параллельное поведение не является экзотикой, напротив, параллельное поведение встречается в жизни чаще последовательного. Мы связываем последовательное выполнение с линейным порядком, а параллельное выполнение — с частичным порядком. Известно, что всякий линейный порядок является частичным, и всякий частичный порядок может быть дополнен до линейного порядка, но не единственным образом [10]. В этой неоднозначности, по нашему мнению, кроется одна из проблем описания параллельного поведения.

Во-вторых, считать действие элементарным — это также некоторая условность. Например, в обычном компьютере при программировании машинная команда считается элементарным действием, но при конструировании процессора одна машинная команда — это сложное поведение, включающее множество действий по загрузке команды, дешифровке кода операции, вычислению адресов в памяти, загрузке данных в регистры, выполнению самой операции в процессоре, выгрузке данных из сумматора и т. д. Поэтому описание поведения никогда не может быть задано абсолютно, но только относительно набора действий базовой машины, которая выбирается произвольно.

В-третьих, описание поведения, как правило, определяет потенциально бесконечное множество протоколов, причем актуальное построение всего множества невозможно и не требуется. Требуется по заданному описанию поведения и входным данным определять частично упорядоченное множество действий, соответствующих данному описанию, т. е. требуется, иначе говоря, выполнять алгоритм или осуществлять поведение. При этом для заданного описания поведения (включая заданные входные данные, если они нужны) частично упорядоченное множество действий может определяться однозначно, как единственная последовательность действий (возможно, пустая, если поведение неосуществимо), и тогда поведение называется детерминированным, или же может определяться неоднозначно, как непустое семейство частично упорядоченных множеств действий, и тогда поведение называется недетерминированным. Таким образом, мы приходим к следующим определениям. *Поведение* — это конечное описание иерархии семейств частично упорядоченных множеств действий. *Модель поведения* — это язык для записи таких описаний.

Обратимся теперь к понятию *состояния*. Прежде всего заметим, что состояние и поведение неразрывно связаны: текущее состояние объекта определяется поведением объекта в прошлом (уже

выполненные действия) и предопределяет поведение объекта в будущем (если временно исключить из рассмотрения случайное поведение). Разумеется, значения всех переменных программного объекта полностью определяют его состояние. Например, конфигурация [7] машины Тьюринга определяется тем, какой символ на ленте обозревается, всеми символами, которые находятся слева и справа от текущего, а также тем, какая строка управляющей таблицы является текущей. Ясно, что конфигураций машины Тьюринга очень много. Следуя А. А. Шалыто [2], мы называем такие состояния *вычислительными*. Если положить в основу описания поведения именно вычислительные состояния, то естественным образом возникает теория машин абстрактных состояний [11], которая с успехом применяется для описания поведения, в частности, вычислительных программ. Однако строки управляющей таблицы машины Тьюринга также называются состояниями, и это не случайно. Такие состояния, вслед за А. А. Шалыто, мы называем *управляющими*. Заметим, что управляющих состояний намного меньше, нежели вычислительных. Конечно, когда машина Тьюринга находится в одном определенном управляющем состоянии, протоколы будущего поведения машины зависят от символов на ленте, но интуитивно мы склонны считать все протоколы в одном состоянии сходными между собой. Отношение сходства протоколов для разных базовых машин можно определять по-разному, но во всех случаях оно оказывается рефлексивным, симметричным и транзитивным, т. е. отношением эквивалентности, а значит, определяет фактор-множество [12]. Так мы приходим к определению: *множество управляющих состояний* — это фактор-множество множества вычислительных состояний по отношению сходства протоколов. Какие протоколы поведения считать сходными — вопрос субъективный, а потому множество управляющих состояний, в отличие от множества вычислительных состояний, не предопределяется поведением однозначно. В этой статье далее термин «состояние» означает управляющее состояние и слово «управляющее» опускается.

Способы описания поведения

Предметом статьи является поиск ответа на вопрос: как наиболее целесообразно выбрать модель поведения, если известен класс поведений, которые требуется описать, или хотя бы некоторые свойства этого класса. Прежде чем предлагать наше решение по выбору, необходимо ответить на вопрос, из чего, собственно, можно выбирать.

Известно множество моделей поведения [13], постоянно предлагаются новые модели и моди-

фицируются уже известные, поэтому исчерпывающий обзор в одной статье вряд ли возможен. На фоне повсеместного распространения UML [14], для подавляющего большинства моделей поведения разработаны удобные графические языки, которыми мы также пользуемся [15]. Исходя из данных нами выше определений поведения и состояния, мы предлагаем следующую классификацию моделей поведения:

- явное выделение состояний;
- потоки управления и данных;
- последовательности сообщений.

В моделях поведения с явным выделением состояний [1] явно присутствуют управляющие состояния, а последовательность действий, напротив, в явном виде не показывается. К этому классу относятся: конечный автомат, машина Тьюринга, сеть Петри, язык SDL. Обычно в качестве графического языка в моделях поведения с явным выделением состояний используют диаграммы графа переходов состояний [16].

В моделях поведения с потоками управления явно присутствует описание класса протоколов (множества последовательностей действий) и класса вычислительных состояний (описание типизированных переменных), а управляющие состояния, напротив, скрыты. К этому классу относятся: блок-схема, диаграмма потоков данных, императивные языки программирования. В этом случае графическим языком являются диаграммы графа деятельности. Наиболее проработанная нотация для потоковых моделей поведения сегодня — это, по нашему мнению, диаграмма деятельности в UML 2 [17].

В моделях поведения с последовательностью сообщений показываются непосредственно протоколы, т. е. последовательности действий, упорядоченные во времени. Фактически поведение описывается индуктивно, на примерах. К этому классу относятся все диаграммы взаимодействия UML, нотация BPMN. Графические языки весьма разнообразны, но чаще всего используются вариации языка MSC.

Наряду с предложенной нами классификацией по внутренним свойствам моделей, давно используются классификации, основанные на свойствах классов описываемых поведений. В известной классификации Д. Харела [16] выделяются реагирующие системы, которые реагируют на изменения внешней среды, и трансформационные системы, которые преобразуют входные данные в выходные. Реагирующие системы часто являются постоянно действующими, а трансформационные системы, напротив, запускаются по мере надобности. В трансформационных системах для описания поведения достаточно описать связь между входом и выходом, т. е. связь между начальным и конечным вычислительными состо-

ниями. Последовательность действий в трансформационных системах не имеет особого значения, если результат вычислен правильно. Для описания связи между значениями переменных на входе и на выходе трансформационного алгоритма достаточно, например, языка исчисления предикатов, и предлагаемая нами модель поведения в этом случае ничего дополнительно не дает, поэтому трансформационные системы в этой статье не рассматриваются.

При реализации реагирующих систем непрерывного действия в большинстве случаев используют одну из двух схем, представленных на рис. 1. Схему на рис. 1, а уместно называть схемой с мониторингом, или *синхронной*, а схему на рис. 1, б — схемой с прерываниями, или *асинхронной*.

В принципе, обе схемы пригодны для реализации требуемого поведения реагирующих систем. Отличие состоит в том, что обработка прерываний, с одной стороны, требует дополнительных накладных расходов на организацию очередей событий, переключение контекстов и т. д. С другой стороны, при работе по прерываниям можно не бездействовать, ожидая события, а занять вычислительные ресурсы какой-либо другой полезной работой. Критерием для выбора одной из двух схем являются следующие количественные соотношения:

- запас производительности, т. е. насколько доступная вычислительная мощность превосходит минимальную мощность, необходимую для выполнения действий реагирующей системы (если вычислительной мощности недостаточно для выполнения необходимых действий, то реагирующая система, очевидно, невозможна);

- степень распределенности, т. е. вся реагирующая система сосредоточена в одном месте или имеется несколько взаимодействующих подсистем;

- номенклатура событий, т. е. как много различных сигналов должна обрабатывать система.

Можно заметить, что ранее запас по производительности был невелик, многие реагирую-

щие системы работали на пределе возможностей аппаратуры, отчего распределенные системы встречались не так часто и реагирующие системы выполняли достаточно узкий набор функций. В настоящее время вычислительная мощность компьютеров выросла значительно, поэтому распределенные системы используются повсеместно и наблюдается тенденция совмещения множества разнородных функций в одной системе. Это хорошо заметно на примере таких реагирующих систем, как кнопочный телефон старого образца и современный смартфон. Поэтому сегодня реагирующие системы чаще оказываются асинхронными, нежели синхронными.

В этой статье предлагается модель поведения прежде всего асинхронных распределенных реагирующих систем (такие системы иногда называют мультиагентными).

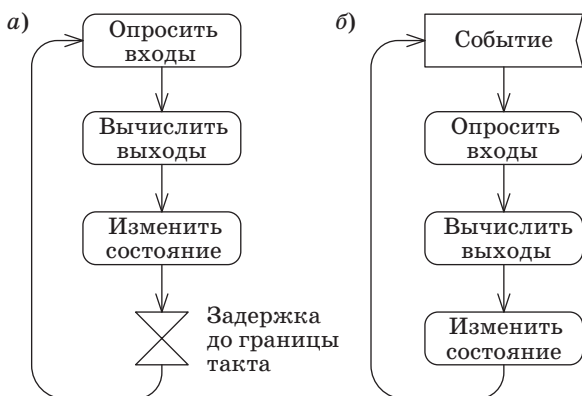
При описании асинхронных распределенных реагирующих систем, как правило, применяются модели поведения с явным выделением состояний. Мы затрудняемся дать формальное истолкование причин этого явления и принимаем его как эмпирический факт. Предлагаемая модель также относится к классу моделей с явным выделением состояний и, как показано в последующих разделах статьи, проявляет свои преимущества именно в случае асинхронных распределенных многофункциональных реагирующих систем.

Моделирование поведения системами автоматных объектов

Центральным понятием предлагаемой модели поведения является *автоматный объект*. Автоматный объект имеет много общего с традиционным конечным автоматом [7], но в то же время обладает существенными отличиями. Так же, как и конечный автомат в форме Мили [18], автоматный объект задается графом переходов состояний, где на каждом переходе указывается *событие* (иногда говорят входное воздействие), инициирующее этот переход, а также могут указываться *сторожевое условие* выполнения перехода и *эффект* (иногда говорят выходное воздействие), производимый в результате перехода. Мы используем следующие расширения модели, каждое из которых выводит предлагаемую модель автоматного объекта из класса конечных автоматов:

- события являются не одиночными символами — элементами конечного алфавита, но могут иметь параметры и могут передавать в автоматный объект произвольный объем информации;

- сторожевые условия могут иметь произвольную сложность и зависеть от текущих значений произвольного числа локальных переменных, а не только от текущего состояния;



■ Рис. 1. Синхронные (а) и асинхронные (б) реагирующие системы

— эффекты также являются не одиночными символами — элементами конечного алфавита, но могут иметь параметры и могут записывать во внешней памяти произвольный объем информации.

Рассмотрим ключевой для дальнейшего изложения рисунок. Схема автоматного объекта, комбинирующая концепции машины состояний, компонентов, портов и интерфейсов унифицированного языка моделирования UML [19], представлена на рис. 2, а. Основное нововведение состоит в том, что мы мыслим машину состояний инкапсулированной в компонент и явно указываем порты и интерфейсы, через которые автоматный объект взаимодействует с внешним миром. Схема связей, традиционная для систем управления, реагирующих на внешние события [2, 3], показана на рис. 2, б. На среднем уровне схемы находится управляющий автомат. Входным алфавитом автомата являются события, посылаемые источником событий. В зависимости от полученных событий и результатов проверки сторожевых условий на переходах автомат меняет свое текущее состояние и выполняет действия на переходах (эффекты), адресованные объекту управления. В традиционной схеме управляющие автоматы, источники событий и объекты управления выглядят неравноправными и раз-

нотипными объектами. В предлагаемой модели источники событий и объекты управления также являются автоматными объектами, что достигается введением соответствующих отношений обобщения (см. рис. 2, б).

Модель автоматного объекта (см. рис. 2, а) построена, исходя из следующих соображений: в соответствии с принципом Б. Мейера [20] операции интерфейса любого объекта следует разделить на *запросы*, доставляющие значения и не меняющие состояние объекта (стереотип «запрос»), и *команды*, меняющие состояние объекта, но не доставляющие значений (стереотип «команда»). Далее, считая обязательным указание для каждого объекта не только предоставляемых, но и требуемых интерфейсов, получаем ровно четыре возможных вида интерфейсов взаимодействия между объектами: предоставляемые команды и требуемые команды, предоставляемые запросы и требуемые запросы. Перечень комбинаций является исчерпывающим, и в этом смысле предлагаемая модель является окончательной и совершенной, поскольку учитывает вообще все возможные типы взаимодействия объектов, удовлетворяющие принципу Б. Мейера.

Применяя это наблюдение к автоматам, получаем ровно четыре возможных вида интерфейсов между автоматом, его источником событий и объектом управления (см. рис. 2, а):

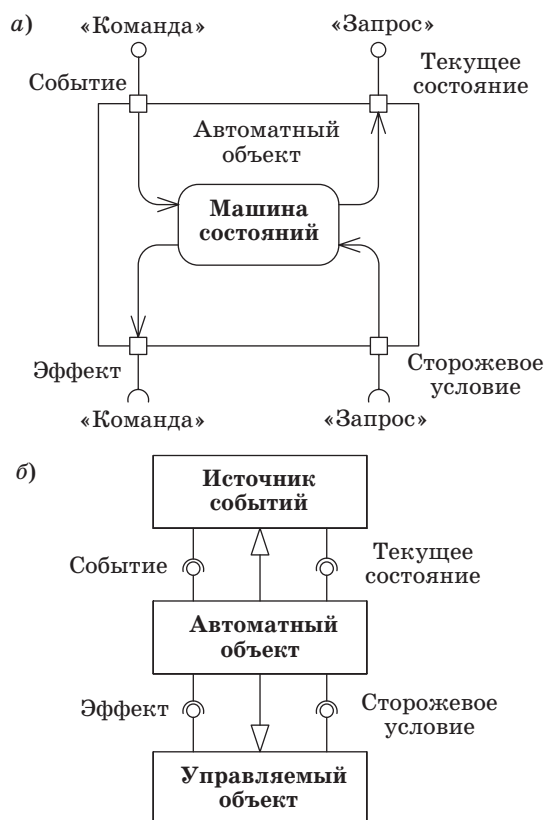
- события на переходах автомата являются предоставляемыми командами автомата, аргументы событий, если они есть, инициализируют локальные переменные автомата;

- сторожевые условия на переходах являются логическими выражениями над значениями, которые доставляют требуемые запросы к объекту управления;

- эффекты — это требуемые команды объекта управления, в качестве аргументов могут передаваться значения локальных переменных автомата;

- автомат может предоставлять запросы о своем текущем состоянии и значениях других локальных переменных.

Мы утверждаем, что в практических случаях из соображений декомпозиции удобнее описывать поведение не одним автоматным объектом, а системой взаимодействующих автоматных объектов. Все автоматные объекты в системе равноправны, и каждый из них взаимодействует с другими автоматными объектами и с внешней средой через интерфейсы четырех типов (см. рис. 2, а). Источником событий и объектом управления для данного автоматного объекта могут быть как внешние объекты, так и этот же или другой автомат системы. Таким образом, источники событий, объекты управления, управляющие автоматы — это все автоматные объекты, а источники событий и объекты управления — не более чем автоматные



■ Рис. 2. Автоматный объект (а) и его связи (б)

объекты со специализированными интерфейсами (см. рис. 2, б). Унифицированная трактовка управляющих автоматов, объектов управления и источников событий как автоматных объектов является самым важным преимуществом предложенной модели по сравнению со всеми ранее предложенными моделями автоматного программирования [1–3].

Далее, в предлагаемой автоматной модели мы можем связывать автоматные объекты через соответствующие интерфейсы произвольным образом. Можно предоставляемый командный интерфейс одного автомата связать с требуемыми командными интерфейсами других автоматов, и первый автомат станет «слушаться нескольких командиров». Можно требуемый командный интерфейс одного автомата связать с предоставляемыми командными интерфейсами других автоматов, и первый автомат станет «командовать несколькими подчиненными». Можно связывать предоставляемые интерфейсы с требуемыми интерфейсами того же автомата, и автомат сам себе начнет посылать события — возможности автоматной модели ничем не ограничены!

Более того, предлагаемая автоматная модель естественным образом подразумевает асинхронность, параллельность и недетерминированность. Совсем нетрудно получить привычную последовательную схему: достаточно вытянуть автоматы в линейку, связывая предоставляемые интерфейсы предыдущего с требуемыми интерфейсами по-

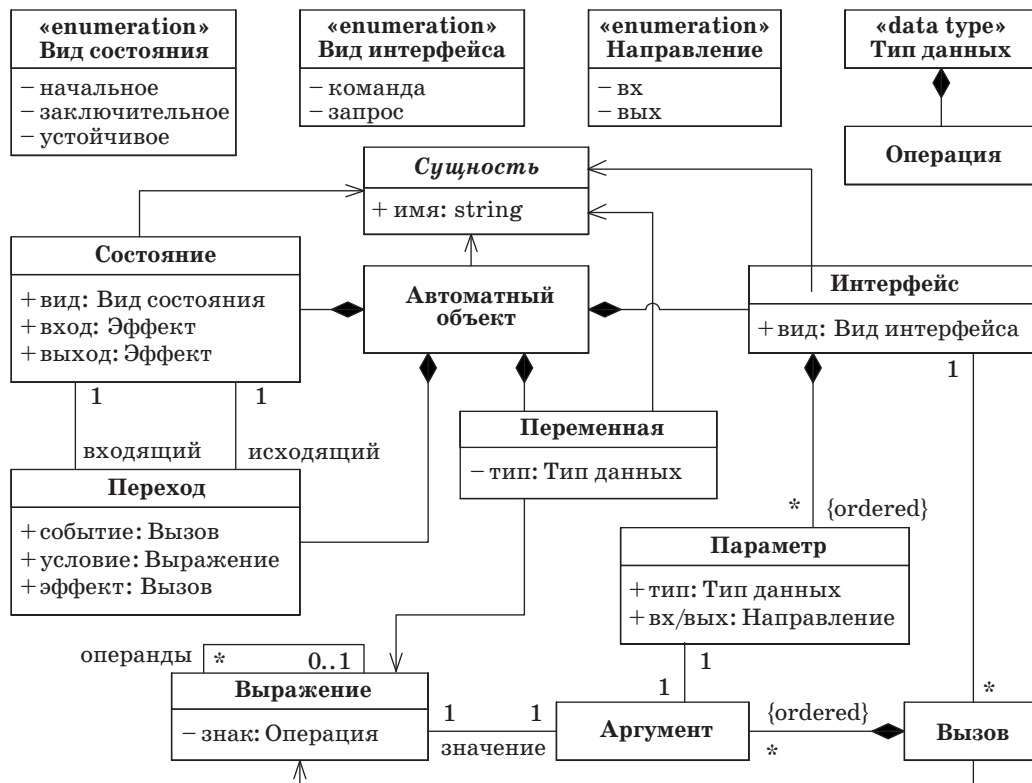
следующего. Но если нет ограничений последовательного выполнения, то в предлагаемой модели можно строить естественные параллельные схемы, весьма эффективные на современных платформах.

Мета модель языка автоматных объектов

Нотация предлагаемой модели поведения образует самостоятельный графический язык, который мы назвали ЧАО (CIAO — Cooperative Interaction of Automata Objects). Графический язык ЧАО предназначен для:

- наглядного описания и визуализации сложного поведения;
- публикации (параллельных) алгоритмов;
- построения имитационных моделей сложного поведения и доказательного исследования этих моделей;
- быстрого прототипирования программного обеспечения распределенных реагирующих систем.

Графический язык ЧАО является совместной комбинацией и расширением диаграммы автомата и диаграммы компонентов унифицированного языка моделирования UML [19]. Для определения языка, в особенности графического, мы предпочитаем использовать мета модель в форме диаграммы классов [21–23]. На рис. 3 представлена мета модель языка ЧАО.



■ Рис. 3. Мета модель языка описания поведения ЧАО

Язык имеет четыре основные именованные сущности: автоматный объект, состояние, интерфейс и переменную. Автоматный объект является классификатором в смысле языка UML и потому обозначается прямоугольником, состояния и интерфейсы трактуются и обозначаются в точности так, как это принято в языке UML [19]. Переменные обозначаются в текстовом виде, как это принято в языках программирования. Заметим, что переменная — это примитивный автоматный объект с командой присваивания значения (*set*) и с запросом получения присвоенного значения (*get*). Таким образом, использование переменных не нарушает «чистоту» автоматного программирования и является не более чем «синтаксическим сахаром», введенным для удобства.

Переходы между состояниями изображаются в виде стрелочек, нагруженных указанием события, сторожевого условия и эффекта перехода в текстовом виде. События обязаны быть предоставляемыми командами, эффекты обязаны быть требуемыми командами, сторожевые условия строятся из требуемых запросов. Синтаксис всех этих конструкций принят такой же, как в обычных языках программирования: выражения, в частности сторожевые условия, составлены из имен переменных и вызовов функций с помощью знаков операций, события и эффекты оформляются как операторы вызова функций без результата (процедуры). Особо оговорим синтаксис предоставляемых запросов. По определению, запрос не меняет состояния, поэтому запрос — это петля, присутствующая всем состояниям. Мы изображаем ее единожды, как петлю объемлющего составного состояния, т. е. петлю самого автоматного объекта.

В целом нотация языка ЧАО нам представляется достаточно простой и наглядной, поэтому не стоит здесь останавливаться на деталях — они проясняются в последующих примерах.

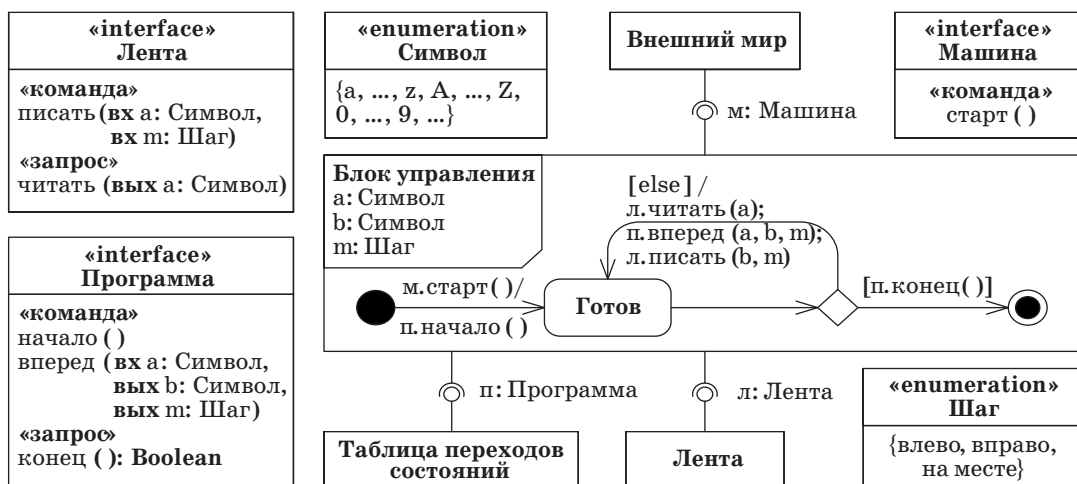
Алгоритмическая полнота модели поведения

Предлагаемая модель поведения алгоритмически полна по Тьюрингу [7]. Этот факт подтверждается эмулятором машины Тьюринга (рис. 4).

Система автоматных объектов, приведенная на рис. 4, — не самый лаконичный вариант реализации машины Тьюринга, но эта диаграмма прямо соответствует обычным словесным описаниям машины [7], а потому подходит для демонстрации алгоритмической полноты. Эмулятор машины Тьюринга состоит из трех автоматных объектов: блока управления, программной памяти, хранящей таблицу переходов состояний, и ленты. Кроме того, на диаграмме присутствует объект, поведение которого не определено, — это внешний мир, про существование которого часто забывают упомянуть, описывая машину Тьюринга. Автоматные объекты связаны интерфейсами **Машина**, **Программа** и **Лента**, операции этих интерфейсов полностью специфицированы. При этом автоматный объект **Блок управления** раскрыт, т. е. показан граф переходов состояний и локальные переменные, а прочие объекты не раскрыты.

Поясним используемые обозначения. Диаграмма автомата заключена в рамку по правилам UML [19]. В ярлычке рамки написано название автоматного объекта и перечислены локальные переменные. Предоставляемые и требуемые интерфейсы обозначены «шарнирами» в соответствии с нотацией UML 2, кроме того, указаны имена и типы интерфейсов. Имена интерфейсов и операций используются на переходах автомата для указания переключающих событий, сторожевых условий и выполняемых действий.

Опишем содержание рис. 4 на естественном языке. Блок управления предоставляет только од-



■ Рис. 4. Описание поведения машины Тьюринга



■ Рис. 5. Дополнительные интерфейсы машины Тьюринга

ну команду: **старт**. После старта память программы машины Тьюринга переводится в исходное состояние, машина переходит в состояние **Готов** и сразу (спонтанно, как это предусмотрено в UML), считывает символ **a** с ленты, движется вдоль ленты в направлении **m**, записывает на ленту символ **b** и т. д. Не имеет значения, что находится внутри «черных ящиков» **Внешний мир**, **Таблица переходов состояний** и **Лента**. Там могут быть автоматные объекты любого рода, электронные устройства или люди и т. д. Все работает отлично, если объявленные интерфейсы предоставляются и подписанные контракты соблюдаются.

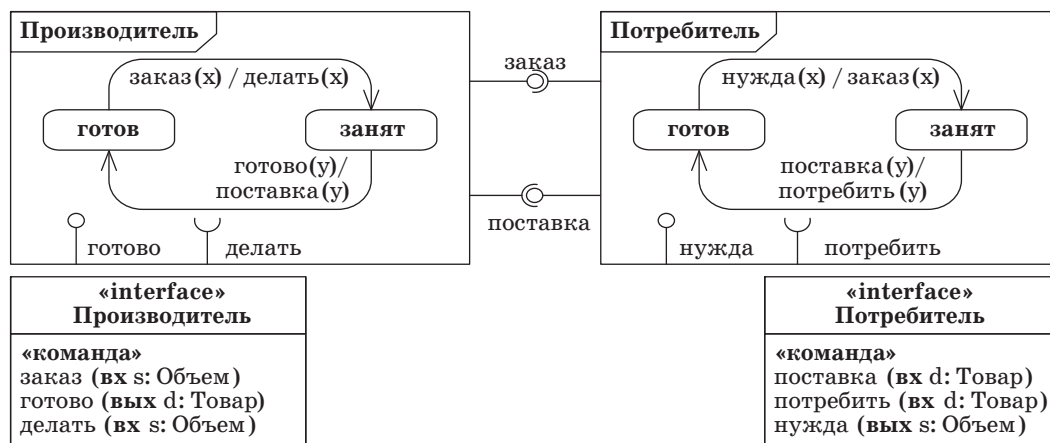
Мы видим, что неформальное описание поведения машины Тьюринга схвачено довольно хорошо. Но представляет ли эта схема практический интерес? Может ли это быть полезным при анализе, сравнении и согласовании описаний поведения? Мы считаем, что да. Даже поверхностный анализ диаграммы показывает, что обычное описание поведения машины Тьюринга неполно и недостаточно для того, чтобы машину Тьюринга можно было бы реально использовать для программирования. Например, нам нужна возможность заполнить ленту исходными символами перед запуском машины, а также нужна возможность рассмотреть результаты после того, как машина Тьюринга достигла конечного состояния. Кроме того, мы должны иметь возможность загрузить таблицу переходов состояний перед за-

пуском машины, и мы нуждаемся в возможности наблюдать за текущим состоянием, если собираемся отлаживать машину Тьюринга. Таким образом, чтобы описать требуемое поведение машины Тьюринга более точно, формально и детально, мы можем ввести дополнительные контракты и интерфейсы (рис. 5). Язык ЧАО это позволяет.

Командное взаимодействие автоматных объектов

Выразительную силу предлагаемой модели поведения мы демонстрируем на известном примере взаимодействующих процессов производителя и потребителя. Производитель последовательно производит порции некоторого товара, а потребитель потребляет их в той же последовательности. Оба процесса независимы и обладают «свободой воли», но они ограничены контрактом.

Мы начнем рассмотрение примера с простейшего контракта: производитель должен произвести товар, если он получил заказ от потребителя, а потребитель должен потребить произведенный товар, если он разместил заказ. Конечно, потребитель не может потребить товар, если он не был произведен, а производитель не должен производить новый товар, если предыдущий не был потреблен. Наше решение не претендует на научную новизну, но оно просто (если не сказать тривиально) и представляется нам очевидным (рис. 6).



■ Рис. 6. Взаимодействие производителя и потребителя

Не требуется никаких ухищрений для организации взаимодействия. Единственное предположение состоит в том, что обработка любого события является атомарной операцией.

Производитель и потребитель связаны через интерфейсы **заказ** и **поставка**. Интерфейс **заказ** является требуемой командой для потребителя и событием для производителя, а интерфейс **поставка** является требуемой командой для производителя и событием для потребителя. Получив событие **заказ** в состоянии **готов**, производитель дает команду **делать** и переходит в состояние **занят** до тех пор, пока не наступит событие **готово**, после чего отправляет произведенный товар потребителю и возвращается в состояние **готов**. Потребитель же, находясь в состоянии **готов**, в случае события **нужда** дает команду **заказ** и переходит в состояние **занят** до тех пор, пока не наступит событие **поставка**, после чего товар потребляется, и потребитель возвращается в состояние **готов**.

Необходимо обратить внимание на две особенности этой модели.

1. Интерфейсы **заказ** и **поставка** служат для взаимодействия производителя и потребителя, поэтому мы изображаем их снаружи прямоугольников, обрамляющих соответствующие автоматные объекты. Интерфейсы **делать** и **готово** производителя (аналогично интерфейсы **нужда** и **потребить** потребителя) являются интерфейсами для взаимодействия с внутренними автоматными объектами (может статься, что это элементарные действия базовой машины), поэтому мы изображаем их внутри прямоугольников автоматных объектов. Именно таким образом в языке ЧАО реализуется важная концепция вложенности автоматов [5].

2. Все команды снабжены параметрами, которые позволяют передавать дополнительную информацию. Вообще говоря, в рассматриваемом простейшем случае можно было бы обойтись без параметров. Однако использование параметров (и переменных) мы считаем важным и полезным свойством языка ЧАО: например, заказанный товар и произведенный товар — это разные вещи, и они обозначены у нас разными буквами.

Наиболее значительным преимуществом предлагаемого способа описания поведения является то обстоятельство, что мы можем формально доказать правильность описания. Действительно, если до начала работы оба автоматных объекта находятся в состоянии **готов**, то любой протокол выполнения является многократным повторением последовательности действий

$$\langle \text{нужда}(x) \rightarrow \text{заказ}(x) \rightarrow \text{делать}(x) \rightarrow \text{готово}(y) \rightarrow \text{поставка}(y) \rightarrow \text{потребить}(y) \rangle.$$

Справедливость этого утверждения следует из однозначности маршрутов в графах переходов состояний. Доказанное формальное утверждение

с лихвой перекрывает неформальную спецификацию контракта, с которой мы начали этот пример. Таким образом, в данном случае описание поведения не нуждается в отладке — оно правильно по построению. Более того, если действие **делать** фактически делает то, что требуется (т. е. y точно соответствует x , что требует отдельной проверки), то можно доказательно утверждать, что каждый раз потребляется в точности то, в чем была нужда. Это полезное свойство описания поведения, которое не было явно затребовано в неформальном описании контракта. В данном случае доказательство правильности получилось очень простым из-за однозначности путей в графах, в других случаях доказательство правильности может потребовать определенных усилий, но сама возможность строить доказательно правильные описания стоит того.

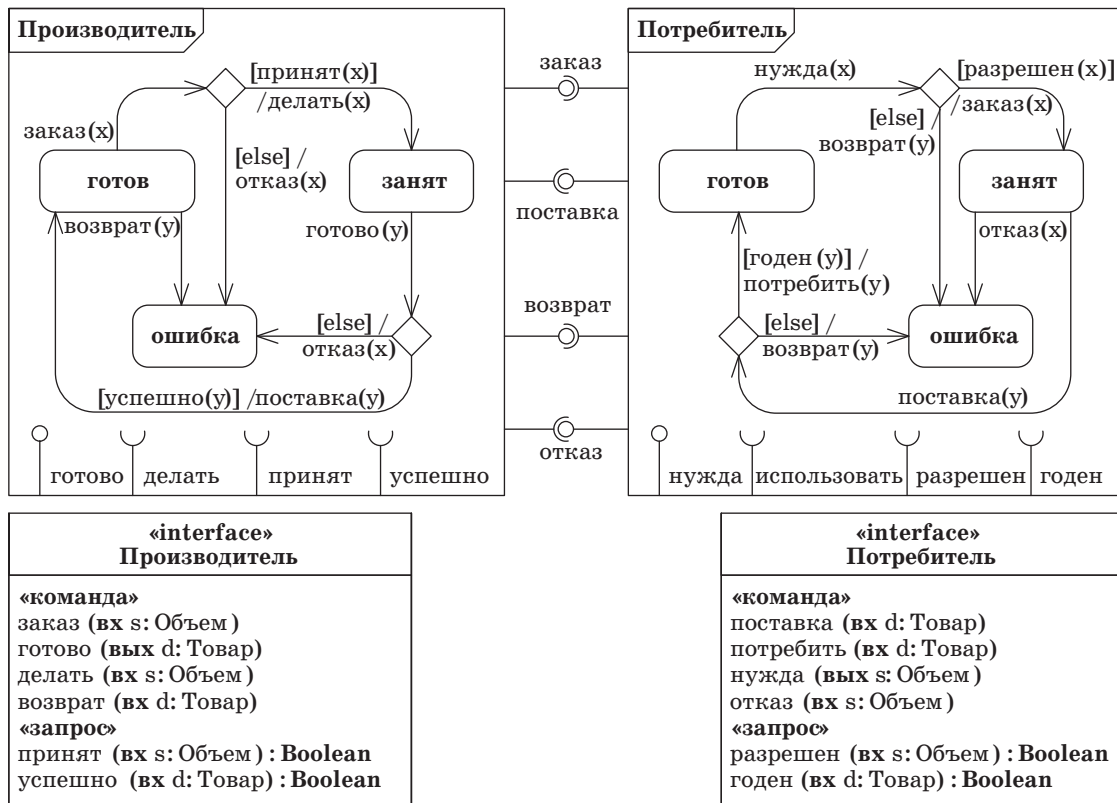
Обработка исключительных ситуаций

В уже рассмотренном простейшем случае предполагалось, что процессы производителя и потребителя работают штатно, без сбоев. Но в жизни бывают нештатные ситуации. Разумная обработка исключений — ключ к надежности. Разумно обработать можно только предусмотренные исключительные ситуации. Допустим, что в процессах производителя и потребителя возможно возникновение следующих исключительных ситуаций:

- 1) производитель не может принять заказ (например, перегружен другими заказами);
- 2) производитель не может выполнить заказ (сломалось оборудование);
- 3) потребитель не может разместить заказ (нет денег);
- 4) потребитель не может потребить поставленный товар (несоответствие качества).

Обработка этих исключений может быть сделана консервативным расширением ранее построенных диаграмм. На диаграммах появляются два состояния **ошибка** и дополнительные командные интерфейсы **возврат** и **отказ**. Наряду с командами мы используем запросы **принят** (проверка возможности принять заказ), **успешно** (результат производства товара), **разрешен** (проверка возможности разместить заказ), **годен** (проверка качества товара) и сегментированные переходы [19] со сторожевыми условиями (рис. 7).

В этом примере мы выбрали простейший вариант обработки исключений, когда при возникновении исключения работа просто останавливается, и главная задача обработчика — не допустить выполнения «лишних» действий, ненужных или даже вредных в исключительной ситуации. Например, если заказ x по каким-то причинам не может быть выполнен, то нежелательно отдавать команду **делать**(x) — это может привести к еще худшим последствиям.



■ Рис. 7. Обработка исключений при взаимодействии производителя и потребителя

В результате получилось достаточно надежное решение, а именно, можно показать, что имеет место расширенное свойство правильности. Если до начала работы оба автоматных объекта находятся в состоянии **готов**, то либо исключений не случается, и тогда любой протокол выполнения является многократным повторением последовательности действий

$\langle \text{нужда}(x) \rightarrow \text{заказ}(x) \rightarrow \text{делать}(x) \rightarrow \text{готово}(y) \rightarrow \text{поставка}(y) \rightarrow \text{потребить}(y) \rangle$,

либо случается ровно одно исключение, протокол завершается событием **отказ** или **возврат**, и оба автоматных объекта переходят в заключительное состояние **ошибка**. Доказательство проводится аналогично предыдущему, но оказывается достаточно пространным, поскольку придется провести разбор случаев.

По нашему мнению, приведенный пример показывает, что предлагаемая модель поведения позволяет наглядно и доказательно описывать достаточно сложное поведение.

Учет ограничений времени

В предыдущем примере события исключительных ситуаций возникают по внутренним причинам автоматных объектов. Однако существуют события, возникающие по внешним причинам.

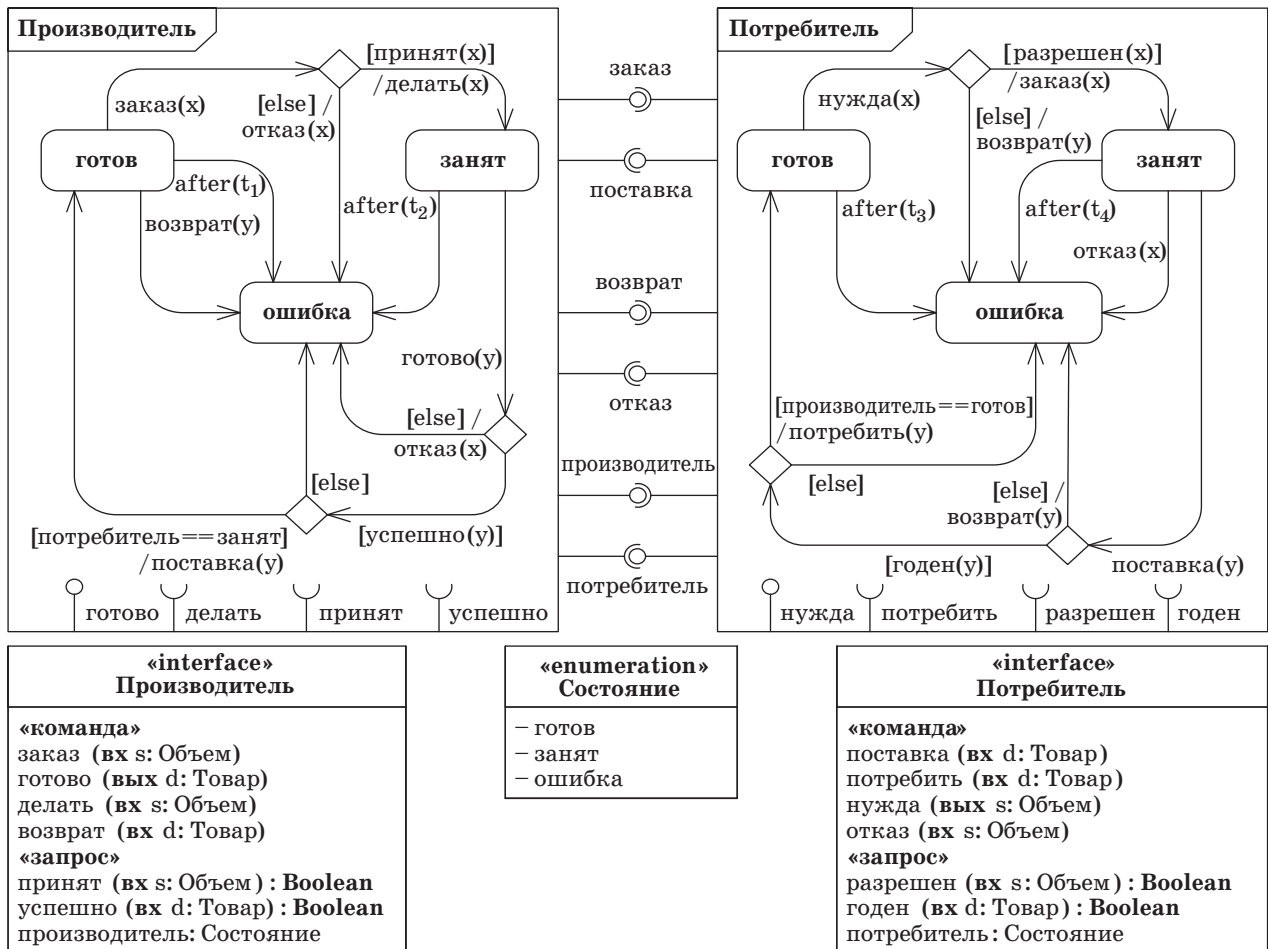
Наиболее часто встречающийся случай — прерывание по времени. Ясно, что реальные производители и реальные потребители не могут находиться в состояниях **готов** и **занят** бесконечно долго.

Пусть заданы следующие четыре интервала времени:

- 1) t_1 — максимальное время, которое производитель может находиться в состоянии **готов**, не получая новых заказов;
- 2) t_2 — максимальное время, которое производитель может находиться в состоянии **занят**, не производя новых товаров;
- 3) t_3 — максимальное время, которое потребитель может находиться в состоянии **готов**, не испытывая нужды;
- 4) t_4 — максимальное время, которое потребитель может находиться в состоянии **занят**, не получая заказанного товара.

Мы считаем, что если любое из этих ограничений нарушено, то возникает исключительная ситуация и автоматный объект переходит в состояние **ошибка**. Решение для этого случая показано на рис. 8.

На диаграммах рис. 8 следует обратить внимание на следующее важное обстоятельство, связанное со временем. Мы используем событие таймера UML (ключевое слово **after** [19]), которое возникает, когда истечет заданный интервал времени. Это очень удобно и естественно при



■ Рис. 8. Взаимодействие с учетом ограничений по времени

описании локальных изменений состояний по времени. Однако из этого следует, что каждый из автоматных объектов не может знать, что в другом объекте произошел переход по времени, поскольку автоматные объекты асинхронны, и время течет в них независимо. Необходимо как-то известить другой автоматный объект. Это можно сделать разными способами. Можно было бы завести специальные события, по одному на каждый возможный переход по времени, и передавать их через специальные интерфейсы, аналогично тому, как это сделано ранее (см. рис. 7). Однако такое решение выглядит тяжеловесным и неубедительным. Можно было бы использовать глобальные часы (ключевое слово *at* [19]) и событие изменения (ключевое слово *when* [19]), чтобы проверять наступление событий в одном автоматном объекте из другого автоматного объекта. Однако такое решение прямо противоречит принципам инкапсуляции. Мы предлагаем и рекомендуем другое решение, основанное на следующем полезном приеме: каждый автоматный объект предоставляет запрос без параметров, доставляющий текущее состояние, а другие авто-

матные объекты могут проверять это состояние. В парадигме автоматного программирования это называется *наблюдаемостью* [1] и обоснованно считается важным преимуществом. В данном случае, прежде чем отдать команду, мы проверяем, готов ли объект выполнить команду, т. е. находится ли он в подходящем состоянии.

Заметим, что новые диаграммы на рис. 8 опять получены консервативным расширением предыдущих диаграмм на рис. 7, т. е. реализуют принцип повторного использования и позволяют провести формальное доказательство правильности методом разбора случаев, хотя разобрать придется достаточно много случаев. В доказательном программировании имеет место следующая принципиальная проблема: как убедиться, что формальное доказательство безошибочности некоторой программы само не содержит ошибок? Общим ответом является построение метода автоматического доказательства правильности. Для систем взаимодействующих автоматных объектов метод автоматического доказательства правильности пока не построен, но мы надеемся, что он возможен и будет предложен в ближайшем будущем.

Параллельное программирование

Мы рассматриваем вопросы параллельного программирования в предлагаемой модели поведения на примере задачи Э. Дейкстры об обедающих философах [24]. Пять философов сидят за круглым столом, перед каждым стоит тарелка спагетти. Вилки лежат на столе между каждой парой тарелок (всего пять вилок). Каждый философ может взять вилку (если она доступна) или положить (если он уже держит ее). Взятие каждой вилки и возвращение ее на стол являются раздельными действиями. Каждый философ может либо есть, либо размышлять. Философ может есть только тогда, когда держит две вилки одновременно. Прием пищи не ограничен (бесконечный запас). Если требуемая вилка занята соседом, голодный философ вынужден ждать — он не может вернуться к размышлениям, не поев. После окончания еды философ кладет вилки на стол для того, чтобы ими могли воспользоваться другие философы. Задача состоит в разработке модели поведения, при котором:

- ни один из философов не голодает (будет вечно чередовать приемы пищи и размышления при бесконечном выполнении программы);

- ресурсы равномерно распределяются между философами (при одинаковом поведении философы едят примерно одинаковое количество времени, никто не получает преимущества);

- философы наделены свободой воли и молчаливы (не общаются непосредственно и нет внешнего агента, который бы командовал ими).

Если бы вилок было с избытком, то жизненный цикл каждого философа был бы очевиден: размышляет → берет правую вилку → берет левую вилку → ест → кладет левую вилку → кладет правую вилку → размышляет. Однако вилок только пять, и возможна взаимная блокировка: философы проголодаются примерно одновременно, возьмут по одной вилке (правой), и умрут от голода в ожидании, когда освободится вторая вилка. Возможны и другие коллизии, многие из которых исследованы в книге [24].

Заметим, что решение задачи об обедающих философах не всегда возможно — многое зависит от соотношения времени размышления и приема пищи. Например, если все философы дольше едят, нежели размышляют, то производительности системы заведомо не хватит, поскольку в лучшем случае одновременно принимать пищу могут два философа, а всего их пять. Случай, когда длительность каждого состояния для каждого философа фиксирована, в нашем контексте очень интересен, поскольку решается предварительным расчетом и статическим составлением расписания. С точки зрения параллельного программирования более интересен случай, когда

потребность в ресурсах (вилках) возникает асинхронно в неизвестные заранее моменты времени, как это обычно бывает в жизни.

Положим, что каждый философ пребывает в одном из трех ортогональных состояний: размышляет, ест или голодает, т. е. закончил размышлять, но не начал есть, поскольку нет свободных вилок. Как обычно в модельных задачах, время считаем дискретным и измеряем натуральными числами. Допустим, что продолжительность размышления T и продолжительность приема пищи E — псевдослучайные величины, распределение которых задано извне (или неизвестно), а продолжительность голодания H определяется нашим алгоритмом. Естественно считать, что величины T , E и H ограничены, причем если величина H достигает верхней границы H_{\max} , то в работе системы возникает исключительная ситуация — несчастный философ умирает от голода.

Голодная смерть представляется нам крайне нежелательным исходом, поэтому мы считаем, что философы из гуманных соображений могут прекратить прием пищи и освободить вилку, когда сосед умирает от голода. Хотя философы между собой не общаются, они могут взаимодействовать через вилки, которые тоже являются автоматными объектами. У вилок есть локальная переменная t — счетчик отказов, который увеличивается на единицу каждый раз, когда была попытка взять вилку в тот момент, когда она занята. Нетрудно видеть, что t — это время голодания соседа, которому вилка нужна, но недоступна. Если время голодания соседа (слева или справа) приблизилось к пределу, то каждый философ прекращает есть спагетти и освобождает вилки. Наше решение приведено на рис. 9.

Из трех требований к решению приоритет отдан первому: ценой некоторых неудобств, связанных с недоеданием и прерыванием трапез, философы не будут умирать с голоду, если это возможно. Второе требование требует знания свойств функций T и E — имеют ли они заданное распределение вероятности или же они зависят от предыстории, и т. д. В этом случае средствами теории вероятностей возможно математически исследовать описание поведения, например, определить математическое ожидание времени голодания и т. д. Третье требование выполнено, философы прямо не общаются, и нет координирующего центра. Это достигнуто за счет того, что вилки наделены не только памятью (как в известном решении с присвоением ресурсам частичного порядка [24]), но и поведением. По нашему мнению, пример убедительно демонстрирует пригодность языка ЧАО для публикации, обсуждения и исследования параллельных и распределенных систем.

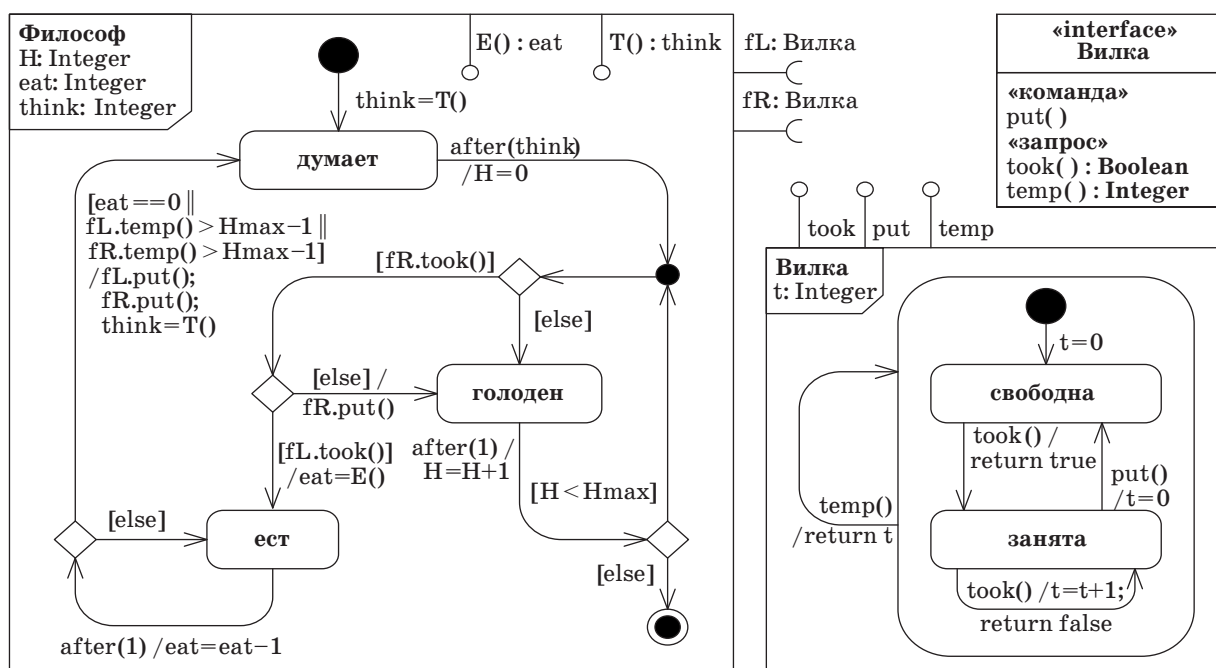


Рис. 9. Описание алгоритма поведения обедающих философов

Заключение

Предложенная модель уже несколько раз была опробована на практике и показала хорошую применимость. В частности, в работах [21–23] описан автоматный метод определения языков предметной области с помощью систем взаимодействующих автоматных объектов. В автоматном методе непосредственно используется предлагаемая модель, хотя язык ЧАО еще имеет латентную форму. В статьях [5, 6] выполнено моделирование специального программного обеспечения для систем реального времени научного назначения (астрономия) с непосредственным использованием данного языка.

Предложенная модель применяется в ряде текущих проектов Специальной астрофизической обсерватории РАН, в Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого, и мы надеемся на положительные результаты.

Рамки одной статьи не позволили охватить важные теоретические вопросы данной модели:

— кооперация взаимодействующих автоматных объектов (схема связей в смысле книги [2]) позволяет устанавливать взаимодействие между

автоматными объектами как статически, так и динамически, во время выполнения, что особенно важно для реагирующих систем, поведение которых должно меняться в зависимости от окружающей среды;

— автоматные объекты допускают неограниченную вложенность при сохранении объектно-ориентированной инкапсуляции. Используемая концепция локальных переменных является примером, но не исчерпывает возможности в этом направлении;

— описание поведения взаимодействующими автоматными объектами более благоприятно для применения математических методов по сравнению с императивным программированием: явное выделение состояний индуцирует явный протокол выполнения, свойства которого можно математически доказывать или количественно оценивать.

Затронутые, но не раскрытые аспекты модели поведения взаимодействующих автоматных объектов, а также практические аспекты реализации системы программирования на основе языка ЧАО мы опишем в последующих статьях в ближайшем будущем.

Литература

1. Шалыто А. А. SWITCH-технология. Алгоритмизация и программирование задач логического управления. — СПб.: Наука, 1998. — 628 с.
2. Поликарпова Н. И., Шалыто А. А. Автоматное программирование. — СПб.: Питер, 2011. — 176 с.

3. Шалыто А. А. Парадигма автоматного программирования // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. 2008. Вып. 53. С. 3–24.
4. Atiskov A. Y. et al. Ontology-Based Analysis of Cryptography Standards and Possibilities of Their Harmonization / A. Y. Atiskov, F. A. Novikov, L. N. Fedorchenko, V. I. Vorobiev, N. A. Moldovyan // Theory and

- Practice of Cryptography Solutions for Secure Information Systems. — Hershey: IGI Global, 2013. — P. 1–33. doi:10.4018/978-1-4666-4030-6.ch001
5. Afanasieva I. V. Data Acquisition and Control System for High-Performance Large-Area CCD Systems // *Astrophysical Bulletin*. 2015. Vol. 70. N 2. P. 232–237. doi:10.1134/S1990341315020108
 6. Афанасьева И. В., Новиков Ф. А. Архитектура программного обеспечения систем оптической регистрации // *Информационно-управляющие системы*. 2016. № 3. С. 51–63. doi:10.15217/issn1684-8853.2016.3.51
 7. Hopcroft J. E., Motwani R., Ullman J. D. *Introduction to Automata Theory, Languages, and Computation*. — Addison-Wesley, 2001. — 521 p.
 8. Bock C., Odell J. Ontological Behavior Modeling // *Journal of Object Technology*. 2011. N 10. P. 1–36. doi:10.5381/jot.2011.10.1.a3
 9. Cormen T. H., et al. *Introduction to Algorithms*/ T. H. Cormen, Ch. E. Leiserson, R. L. Rivest, C. Stein. Third Ed. — Cambridge: The MIT Press, 2009. — 1312 p.
 10. Knuth D. E. *The Art of Computer Programming*. — Addison-Wesley Professional, 2011. — 3168 p.
 11. Börger E., Stärk R. *Abstract State Machines. A Method for High-Level System Design and Analysis*. — Berlin: Springer, 2003. — 438 p. doi:10.1007/978-3-642-18216-7
 12. Новиков Ф. А. *Дискретная математика*. — СПб.: Питер, 2013. — 432 с.
 13. Bock C. Three Kinds of Behavior Models // *Journal of Object-Oriented Programming*. 1999. N 12 (4). P. 36–39.
 14. Booch G., Rumbaugh J., Jacobson I. *The Unified Modeling Language Reference Manual*. — Addison-Wesley, 2010. — 721 p.
 15. Новиков Ф. А. Визуальное конструирование программ // *Информационно-управляющие системы*. 2005. № 6. С. 9–22.
 16. Harel D. Statecharts: a Visual Formalism for Complex Systems // *Science of Computer Programming*. 1987. Vol. 8. P. 231–274. doi:10.1016/0167-6423(87)90035-9
 17. Bock C. UML 2 Activity and Action Models // *Journal of Object Technology*. 2003. Vol. 2. N 4. P. 43–53. doi:10.5381/jot.2003.2.4.c3; Part 2: Actions // *Journal of Object Technology*. 2003. Vol. 2. N 5. P. 41–56. doi:10.5381/jot.2003.2.5.c4; Part 3: Control Nodes // *Journal of Object Technology*. 2003. Vol. 2. N 6. P. 7–23. doi:10.5381/jot.2003.2.6.c1; Part 4: Object Nodes // *Journal of Object Technology*. 2004. Vol. 3. N 1. P. 27–41. doi:10.5381/jot.2004.3.1.c3; Part 5: Partitions // *Journal of Object Technology*. 2004. Vol. 3. N 7. P. 37–56. doi:10.5381/jot.2004.3.7.c4; Part 6: Structured Activities // *Journal of Object Technology*. 2005. Vol. 4. N 4. P. 43–66. doi:10.5381/jot.2005.4.4.c4
 18. Карпов Ю. Г. *Теория автоматов*. — СПб.: Питер, 2002. — 224 с.
 19. Новиков Ф. А., Иванов Д. Ю. *Моделирование на UML. Теория, практика, видеокурс*. — СПб.: Профессиональная литература, Наука и Техника, 2010. — 640 с.
 20. Meyer W. *Object-Oriented Software Construction*. — Prentice-Hall, 2000. — 1406 p.
 21. Новиков Ф. А., Тихонова У. Н. Автоматный метод определения проблемно-ориентированных языков. Ч. 1 // *Информационно-управляющие системы*. 2009. № 6. С. 34–40.
 22. Новиков Ф. А., Тихонова У. Н. Автоматный метод определения проблемно-ориентированных языков. Ч. 2 // *Информационно-управляющие системы*. 2010. № 2. С. 31–37.
 23. Новиков Ф. А., Тихонова У. Н. Автоматный метод определения проблемно-ориентированных языков. Ч. 3 // *Информационно-управляющие системы*. 2010. № 3. С. 29–37.
 24. Hoare C. A. R. *Communicating Sequential Processes*. — Prentice-Hall, 1985. — 256 p. doi:10.1145/357980.358021

UDC 004.434

doi:10.15217/issn1684-8853.2016.6.50

Cooperative Interaction of Automata ObjectsNovikov F. A.^a, Dr. Sc., Tech., Professor, fedornovikov51@gmail.comAfanasieva I. V.^{b,c}, Senior Engineer, Post-Graduate Student, riv@sao.ru^aPeter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 29, Politekhnikheskaia St., 195251, Saint-Petersburg, Russian Federation^bSpecial Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, Nizhnii Arkhyz, 369167, Russian Federation^cSaint-Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, 49, Kronverkskii St., 197101, Saint-Petersburg, Russian Federation

Purpose: We propose a behavior description model which would help to achieve higher parameters of reliability and performance as compared to the conventional methods of developing reactive and distributed systems. Our secondary purpose is creating a user-friendly graphical language to describe parallel algorithms and distributed reactive systems. **Methods:** To describe the behavior, we use state machine diagrams (state transition graphs) of Unified Modeling Language (UML) enhanced with special stereotypes, ports and interfaces. For the description of the proposed graphical language, we use UML class diagrams as a metamodel. **Results:** A behavior model has been developed which uses state transition graphs and relates to the paradigm of automata-based programming. The features and advantages of the proposed model in the class of asynchronous distributed reactive systems are discussed in full details: its algorithm

completeness is proved, the graphical language is defined, examples are given, and the directions for further development are specified. **Practical relevance:** The proposed model was successfully applied to developing specialized software for precision scientific equipment control in observational astronomy. Besides, it was used as a high-level behavior description tool in an automata-based method of determining domain-specific languages.

Keywords — Behavior Model, Automata-Based Programming, State Transition Graph, Unified Modeling Language, Statechart, Class Diagram, Parallel Behavior, Reactive System Architecture.

References

1. Shalyto A. A. *SWITCH-technologia. Algoritmizatsiia i programirovanie zadach logicheskogo upravleniia* [Switch Technology. Algorithmization and Programming of Logical Control Problems]. Saint-Petersburg, Nauka Publ., 1998. 628 p. (In Russian).
2. Polikarpova N. I., Shalyto A. A. *Avtomatnoe programirovanie* [Automata-Based Programming]. Saint-Petersburg, Piter Publ., 2011. 176 p. (In Russian).
3. Shalyto A. A. The Paradigm of Automata-Based Programming]. *Nauchno-tehnicheskii vestnik SPbGU ITMO* [Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics], 2008, vol. 53, pp. 3–24 (In Russian).
4. Atiskov A. Y., Novikov F. A., Fedorchenko L. N., Vorobiev V. I., Moldovyan N. A. Ontology-Based Analysis of Cryptography Standards and Possibilities of their Harmonization. In: *Theory and Practice of Cryptography Solutions for Secure Information Systems*. Hershey, IGI Global, 2013, pp. 1–33. doi:10.4018/978-1-4666-4030-6.ch001
5. Afanasieva I. V. Data Acquisition and Control System for High-Performance Large-Area CCD Systems. *Astrophysical Bulletin*, 2015, vol. 70, no. 2, pp. 232–237. doi:10.1134/S1990341315020108
6. Afanasieva I. V., Novikov F. A. Software Architecture for Optical Detector Systems. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2016, no. 3, pp. 51–63 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2016.3.51
7. Hopcroft J. E., Motwani R., Ullman J. D. *Introduction to Automata Theory, Languages, and Computation*. Addison-Wesley, 2001. 521 p.
8. Bock C., Odell J. Ontological Behavior Modeling. *Journal of Object Technology*, 2011, no. 10, pp. 1–36. doi:10.5381/jot.2011.10.1.a3
9. Cormen T. H., Leiserson Ch. E., Rivest R. L., Stein C. *Introduction to Algorithms* (Third Edition). Cambridge, The MIT Press, 2009. 1312 p.
10. Knuth D. E. *The Art of Computer Programming*. Addison-Wesley Professional, 2011. 3168 p.
11. Börger E., Stärk R. *Abstract State Machines. A Method for High-Level System Design and Analysis*. Berlin, Springer, 2003. 438 p. doi:10.1007/978-3-642-18216-7
12. Novikov F. A. *Diskretnaia matematika* [Discrete Mathematics]. Saint-Petersburg, Piter Publ., 2013. 432 p. (In Russian).
13. Bock C. Three Kinds of Behavior Models. *Journal of Object-Oriented Programming*, 1999, no. 12 (4), pp. 36–39.
14. Booch G., Rumbaugh, J., Jacobson I. *The Unified Modeling Language Reference Manual*. Addison-Wesley, 2010. 721 p.
15. Novikov F. A. Visual Software Design. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2005, no. 6, pp. 9–22 (In Russian).
16. Harel D. Statecharts: a Visual Formalism for Complex Systems. *Science of Computer Programming*, 1987, vol. 8, pp. 231–274. doi:10.1016/0167-6423(87)90035-9
17. Bock C. UML 2 Activity and Action Models. *Journal of Object Technology*, 2003, vol. 2, no. 4, pp. 43–53. doi:10.5381/jot.2003.2.4.c3; Part 2: Actions. *Journal of Object Technology*, 2003, vol. 2, no. 5, pp. 41–56. doi:10.5381/jot.2003.2.5.c4; Part 3: Control Nodes. *Journal of Object Technology*, 2003, vol. 2, no. 6, pp. 7–23. doi:10.5381/jot.2003.2.6.c1; Part 4: Object Nodes. *Journal of Object Technology*, 2004, vol. 3, no. 1, pp. 27–41. doi:10.5381/jot.2004.3.1.c3; Part 5: Partitions. *Journal of Object Technology*, 2004, vol. 3, no. 7, pp. 37–56. doi:10.5381/jot.2004.3.7.c4; Part 6: Structured Activities. *Journal of Object Technology*, 2005, vol. 4, no. 4, pp. 43–66. doi:10.5381/jot.2005.4.4.c4
18. Karpov Iu. G. *Teoriia avtomatov* [Automata Theory]. Saint-Petersburg, Piter Publ., 2002. 224 p. (In Russian).
19. Novikov F. A., Ivanov D. Iu. *Modelirovanie na UML. Teoriia, praktika, videokurs* [Modeling in UML. Theory, Practice, Video Course]. Saint-Petersburg, Professional'naia literatura, Nauka i Tekhnika Publ., 2010. 640 p. (In Russian).
20. Meyer B. *Object-Oriented Software Construction*. Prentice-Hall, 2000. 1406 p.
21. Novikov F. A., Tikhonova U. N. An Automata Based Method for Domain Specific Languages Definition. Part 1. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2009, no. 6, pp. 34–40 (In Russian).
22. Novikov F. A., Tikhonova U. N. An Automata Based Method for Domain Specific Languages Definition. Part 2. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2010, no. 2, pp. 31–37 (In Russian).
23. Novikov F. A., Tikhonova U. N. An Automata Based Method for Domain Specific Languages Definition. Part 3. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2010, no. 3, pp. 29–37 (In Russian).
24. Hoare C. A. R. *Communicating Sequential Processes*. Prentice-Hall, 1985. 256 p. doi:10.1145/357980.358021

УЛУЧШЕНИЕ КАТЕГОРИРОВАНИЯ ВЕБ-САЙТОВ ДЛЯ БЛОКИРОВКИ НЕПРИЕМЛЕМОГО СОДЕРЖИМОГО НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА СТАТИСТИКИ HTML-ТЭГОВ

Д. А. Новожилов^{а, б}, студент

А. А. Чечулин^а, канд. техн. наук, старший научный сотрудник

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

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

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

Постановка проблемы: постоянный рост объема доступной информации в сети Интернет приводит к повышению сложности обнаружения нежелательной и вредоносной информации. Существующие системы используют автоматическую классификацию по текстовому содержимому веб-сайтов, однако данный метод не подходит для веб-сайтов с изменчивым содержимым, таких как новости, форумы и т. п. **Цель исследования:** повысить защищенность пользователей от нежелательной информации за счет улучшения качества категорирования веб-сайтов методами Data Mining для автоматизированных систем родительского контроля. **Результаты:** разработаны улучшенные алгоритмы классификации веб-сайтов и прототип системы родительского контроля, который осуществляет классификацию веб-сайтов, используя их структурные особенности. Основная идея заключается в анализе не текстовых признаков, а статистики HTML-тэгов, которая представляет собой совокупность их частот встречаемости (отношение числа экземпляров данного тэга к общему количеству тэгов на странице, выраженного в процентах). Всего алгоритм выбирает 25 основных тэгов по всей выборке, после чего для каждого из сайтов считается его статистика. Приведена архитектура системы категорирования, состоящей из нескольких программных модулей, написанных на языке Perl, и специального программного обеспечения RapidMiner. Для разработанного прототипа проведены эксперименты на нескольких наборах данных, после чего выполнено сравнение качества категорирования при использовании текстовых, структурных признаков, а также их комбинации. Полученные результаты показали, что анализ статистики тэгов не может использоваться в качестве самостоятельного метода, но является полезным дополнением к системам, опирающимся на текстовую классификацию (позволяет повысить ее качество в метрике «аккуратность» от 6,9 до 10,6 % в зависимости от количества категорий). **Практическая значимость:** данный подход может применяться для повышения эффективности поиска информации, запрещенной законами Российской Федерации: пропаганды экстремизма; разжигания ненависти и вражды; пропаганды порнографии, наркотиков, антиобщественного поведения и т. д. Также данный подход может использоваться в системах родительского контроля для ограничения доступа к определенным видам информации по возрастным категориям.

Ключевые слова — Data Mining, анализ данных, защита от информации, категорирование веб-сайтов, анализ HTML-тэгов, статистика тэгов.

Введение

Как известно, методы Data Mining занимают обнаружением в данных скрытых знаний: неизвестных, нетривиальных и практически полезных. В ходе работ по анализу данных часто возникает необходимость отнесения исследуемого объекта к одному из множества заранее определенных классов — задача классификации. Правильное ее решение приводит к значительным успехам во многих областях. Например, применяемая в сфере коммерции персонализация клиентов, под которой понимают автоматическое распознавание их принадлежности к определенной целевой аудитории, помогает компаниям проводить более гибкую маркетинговую политику. Не менее значимо и обеспечение безопасности при операциях с пластиковыми картами в электронных платежных системах. Data Mining на основе действий клиента позволяет относить его к одной из двух категорий: «легальный пользователь» или «злоумышленник», — обнаруживая таким образом случаи мошенничества.

Наше время отмечено непрерывным развитием и повсеместным распространением Интернета. В связи с этим возрастает значение автоматических систем классификации, распределяющих веб-страницы по категориям и блокирующих те из них, которые являются нежелательными или оскорбительными. Это бывает чрезвычайно важно, например, для ограждения детей от сайтов с неприемлемым содержанием или для противодействия распространению вредоносного и пиратского контента. Именно поэтому данному вопросу уделяется все большее внимание.

Существует множество различных подходов к классификации сайтов. Среди них наиболее эффективным и широко используемым является анализ текстового содержания веб-страниц. Однако присутствуют некоторые категории сайтов: forum, blog, news, — которые почти не различаются текстовым наполнением, тогда как структурные особенности у них разные. В подобных ситуациях переходят к другим методам классификации, например, анализу URL-адресов страниц или HTML-тэгов их разметки. Один из вари-

антов при последнем подходе заключается в том, чтобы проверять наличие/отсутствие тех или иных тэгов.

В данной статье предлагается оригинальный подход, который, в отличие от уже существующих, основывается на анализе статистики HTML-тэгов, представляющей собой отношение всех вхождений того или иного тэга к общему числу тэгов на сайте.

Основная цель исследования — разработать подход к классификации веб-сайтов на основе анализа их структурных особенностей, чтобы повысить качество категорирования в тех случаях, когда классификация по тексту затруднена.

Обзор существующих решений

У задачи классификации сайтов существуют различные методы решения на основе анализа 1) текстового содержимого веб-страниц, 2) URL, 3) HTML-тэгов.

Наиболее широко применяется метод классификации по тексту, состоящий из двух последовательных этапов. На первом проводится подготовка данных с переводом их в форму, воспринимаемую классификатором. Один из примеров последовательности действий на данном этапе — удаление тэгов разметки и извлечение текстового содержимого веб-страниц, выполнение операции стемминга (сохранение основы слов и отбрасывание их окончаний), исключение знаков препинания, стоп-слов в виде предлогов, союзов, местоимений и т. д. Второй этап состоит в подаче предварительно обработанных данных на тот или иной классификатор (Naive Bayes, SVM и т. д.). Чаще используются методы с разделением на тестовую и обучающую выборки (supervised method). Наглядным примером может быть статья [1] с описанием метода SVM. Однако в работе [2] предлагается метод без предварительного обучения (unsupervised method), предназначенный для классификации по тексту с небольшими затратами ресурсов или для создания обучающих выборок. По нему документ делится на предложения, а затем каждому предложению сопоставляется категория на основе предварительно подготовленных списков ключевых слов и метрики подобия предложений (sentence similarity measure).

Интересный пример различных вариантов текстовой классификации приведен в статье [3], в которой в ходе рассмотрения техник определения спама предлагаются варианты категоризации на основе общего числа слов на странице, средней длины слова, принадлежности слов веб-страницы к набору из наиболее часто встречаемых слов, вычисления статистики n -грамм (комбинаций из n символов).

Другая альтернатива — перейти от рассмотрения документов как наборов слов к анализу их значений, которые берутся из лексических баз данных. Это имеет смысл, поскольку, например, в русском языке слово «коса» может указывать на заплетенные волосы, садовый инструмент или каменную гряду. Аналогично английское слово «base» может означать военный лагерь или термин в бейсболе. Однако эксперименты показали, что рассмотрение смысла слов хотя и несколько повышает величину аккуратности, но не ведет к значительному улучшению категоризации [4].

Минус текстовой классификации состоит в том, что она не учитывает особенности веб-страниц: HTML-документ связан ссылками с другими документами, содержит изображения и иные нетекстовые элементы. Также трудности вызывают категории, обладающие сходным текстовым наполнением, но различающиеся по своей структуре (например, blog, forum, chat).

По изложенным причинам получил развитие метод, основанный на анализе URL. Здесь исходят из предположения, что страницу в Интернете будут редко посещать, если она не вызывает интерес у возможных читателей. То есть адрес сайта должен каким-то образом отражать его тематику [5]. Один из способов анализа заключается в разбиении URL на составные части, которые и будут анализироваться. Такой подход реализован при анализе URL в целях защиты от фишинговых сайтов [6]. Также имеет значение, на какой позиции находится тот или иной фрагмент адреса сайта. Например, авторы приводят следующие ссылки, содержащие фрагмент «paypal» и иллюстрирующие эту мысль: <http://www.paypal.com/> и <http://www.paypal.com.hostingcompany.com/>.

Таким образом, каждый фрагмент URL представляется в виде двумерного вектора, содержащего сам фрагмент и его позицию, которые затем подаются на вход обученному классификатору.

Другой способ состоит в использовании длины имени хоста и всего URL, подсчете количества в нем различных символов (например, «.») и анализе заключенных между этими символами фрагментов URL. Кроме того, используются также признаки на основе информации о хосте (географические особенности, дата регистрации, величина TTL и т. д.). Все эти атрибуты подаются на вход какому-либо классификатору (Naive Bayes, SVM, Logistic Regression) [7].

Дальнейшее разделение URL на фрагменты может быть проведено, в частности, с использованием энтропии, что позволяет разбивать на составные части названия доменов, в которых несколько слов слиты воедино, например «activatealert». То из пробных разбиений, которое имеет наименьшую энтропию среди остальных, станет наиболее вероятным новым фраг-

ментом [8]. В работах [8, 9] упоминается также о способе, связанном с анализом последовательности n -грамм (комбинаций из n символов), для которых считается частота встречаемости.

Метод на основе n -грамм способен показывать хорошие результаты категоризации при решении частных задач (спам/обычное письмо, phishing/benign), однако в общем случае, при произвольном количестве и составе категорий, качество классификации снижается. Главная причина заключается в том, что в действительности не всегда адрес страницы в Интернете совпадает с ее содержанием.

Таким образом, для выявления категорий, основанных на структурных признаках, необходимо искать другие методы, одним из которых может быть использование информации о HTML-тэгах сайта. Здесь также существуют различные подходы к анализу.

Важным источником может служить информация, заключенная в таких тэгах, как <title> или <meta>, которая, наряду с текстовым содержимым веб-страниц, извлекалась специальным парсером [10–12].

С другой стороны, существуют методы, основанные на подсчете количества тэгов на странице [12, 13].

В данной статье рассмотрен оригинальный подход, который, в отличие от существующих, основывается на анализе не содержания или количества HTML-тэгов на странице, а их статистики, которая определяется как отношение всех вхождений того или иного тэга к общему числу тэгов на сайте. Настоящая работа является продолжением исследований в области защиты от нежелательной информации, проводимых лабораторией и изложенных в ряде статей [14–18].

Предлагаемый подход

Как известно, веб-страницы отличаются от обычных документов прежде всего тем, что они полуструктурированы (semi-structured) с помощью HTML-тэгов разметки, связаны между собой ссылками, содержат фрагменты кода, исполняемого как на стороне сервера, так и у клиента. Поэтому не обязательно ограничиваться исключительно текстовой классификацией, можно воспользоваться другими методами, более полно учитывающими специфику анализируемых данных. Одно из возможных решений — применение других подходов, связанных со структурными особенностями веб-страниц, например, с анализом HTML-тэгов.

Предлагаемый метод также не опирается на сохраненные исходные тексты веб-страниц для последующего их анализа, а работает со статистикой HTML-тэгов. Под статистикой S тэгов понимается совокупность их частот встречаемости f_i ,

которые считаются как отношение числа экземпляров данного тэга n_i к общему количеству тэгов на странице N , выраженное в процентах. Результат округляется до десятых для обеспечения большей информативности:

$$S = \cup f_i; f_i = (n_i / N) \cdot 100\%.$$

Следует отметить, что такое решение было найдено не сразу, и сначала анализировалось простое количество тэгов каждого вида на странице. Однако данный подход является не совсем правильным, поскольку, например, 100 тэгов <div> на страницах, состоящих из 250 и 1000 тэгов, некорректно сравнивать, и они указывают на совершенно разный результат.

Итоговый классификатор строится на основе алгоритмов Naïve Bayes и Decision Tree, базовые предсказания которых объединяются на верхнем уровне с помощью Stacking. Далее приводится более подробное описание перечисленных методов.

Алгоритм Naïve Bayes основан на применении теоремы Байеса, известной из теории вероятности. Отличительной чертой является «наивное» предположение о независимости событий. В применении к задаче классификации данных она может формулироваться следующим образом.

Имеется множество $W = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$ веб-страниц для категоризации и задано множество категорий $C = \{c_1, c_2, \dots, c_k\}$. Если каждая веб-страница может быть отнесена только к одной категории, тогда вероятность для сайта s попасть в категорию c определяется формулой Байеса

$$p = \arg \max_{c \in C} P(c|S) = \\ = \arg \max_{c \in C} (P(c) \cdot P(S|C) / P(s)).$$

Вероятность $P(s)$ может не учитываться, поскольку она является постоянной величиной (не зависит от категории).

Преимуществом алгоритма является малое количество данных для обучения, необходимых для оценки параметров при классификации, простота реализации и низкие вычислительные затраты. В тех редких случаях, когда признаки действительно независимы (или почти независимы), наивный байесовский классификатор (почти) оптимален.

Среди недостатков — относительно низкое качество классификации в большинстве реальных задач, где нарушается предположение независимости (например, в естественном языке вероятность появления слова сильно зависит от контекста).

Деревья принятия решений (Decision Tree) — иерархическая структура данных, которая не только способна решить задачу классификации, но и позволяет с легкостью интерпретировать полученные результаты, чтобы объяснить, почему

объект был классифицирован тем или иным образом [19].

В деревьях решений определяется значение целевого атрибута, обозначенного как label. Основа генерации деревьев решений — рекурсивное разбиение выборки на подмножества на основе значений атрибутов, выбираемых по определенному критерию. Рекурсия прекращается, когда все элементы подмножества или большинство имеют одинаковое значение атрибута label. Возможны и другие варианты остановки алгоритма, например достижением максимальной глубины дерева.

К преимуществам метода относятся быстрый процесс обучения; генерация правил в областях, где эксперту трудно формализовать свои знания; извлечение правил на естественном языке и простота интерпретации.

Среди недостатков — неприменимость к наборам данных, где число возможных исходов велико. Тогда деревья «переполнены данными», имеют много узлов и ветвей, и в них очень трудно разобраться. Для деревьев решений обычно характерны высокие результаты по метрике точности при снижении показателя полноты. Кроме того, одна из особенностей деревьев решений заключается в том, что они нередко могут образовывать «поглощающую» категорию, к которой ошибочно относится большое количество данных из других категорий.

Для повышения общего качества классификации можно использовать не только какой-либо один алгоритм анализа данных, но и их комбинации, получившие названия мета-алгоритмов. При таком подходе обучается набор базовых классификаторов, после чего результаты их прогнозов объединяются, например, путем взвешенного усреднения или голосования.

Существуют различные мета-алгоритмы. Один из них — метод под названием Boosting, особенность которого состоит в том, что базовые классификаторы обучаются последовательно. При этом обучающий набор данных для каждого последующего базового классификатора зависит от точности прогноза предыдущего. Алгоритм Bagging предлагает другой подход, в котором из всех собранных данных случайным образом выбираются подмножества (случайный выбор с возвратом), которые подаются на вход каждой из моделей мета-алгоритма, а их результаты комбинируются. Существуют и другие методы.

В данной работе применяется алгоритм Stacking. Он использует в качестве базовых моделей различные классификационные алгоритмы, обучаемые на одинаковых данных. Затем мета-классификатор обучается на исходных данных, дополненных результатами прогноза базовых алгоритмов. Идея Stacking заключается в том,

что мета-алгоритм учится различать, какому из базовых алгоритмов следует «доверять» на каких областях входных данных.

Для оценки качества классификации используются такие метрики, как точность (precision), полнота (recall), аккуратность (accuracy) и F-мера — метрика, объединяющая в себе информацию о точности и полноте, представляющая собой гармоническое среднее между этими двумя метриками.

Следует отметить, что для класса систем, выполняющих функции родительского контроля или защиты от вредоносного программного обеспечения, которые и находятся в фокусе данного исследования, особое значение приобретает метрика «точность», поскольку большое количество ложных срабатываний может послужить причиной отказа от использования подобных систем.

Реализация предлагаемого подхода

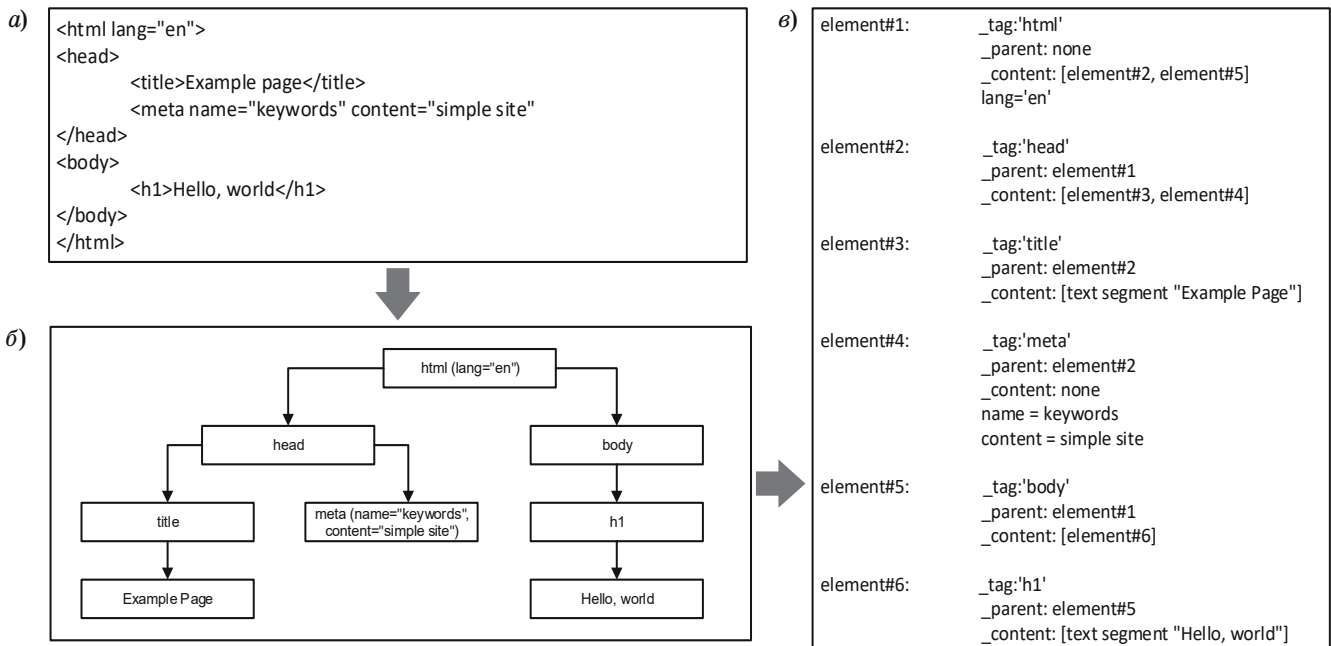
Задачу нахождения частоты тэгов можно решать несколькими различными способами: 1) поиском тэгов по всему HTML-документу и подсчетом количества вхождений каждого из них; 2) используя представление HTML-документа в виде дерева, которое значительно упрощает решение задачи, предоставляя различные функции навигации и доступа к его элементам.

Одним из аргументов в пользу второго подхода явилось наличие подобной древовидной структуры данных — она строилась для нужд анализа документа и сохранения его текстового содержания в файл без HTML-тэгов (рис. 1, а–е).

Таким образом, модуль, отвечающий за статистику тэгов на странице, был построен на основе модификации уже имеющегося модуля определения основного языка веб-страницы и сбора данных, что значительно облегчило его разработку. Обе программы написаны на языке Perl. Этот язык программирования включает мощные инструменты обработки текста, которые делают его идеальным для работы с HTML, XML и другими языками разметки или естественными.

При использовании функционала стандартных классов HTML::TreeBuilder и HTML::Element была создана функция, которая выгружает все тэги узла и его потомков в ассоциативный массив (рис. 2).

Ключом является название тэга, а значениями — все его представители, количество которых подсчитывается. Если функцию применить к корню дерева, то будет получено решение задачи. Для дальнейшего анализа используются все тэги, частота которых превышает 2 % (установленное опытным путем значение, позволяющее исключить из рассмотрения общие для всех страниц тэги, такие как <html>, <title>, <head>,



■ **Рис. 1.** Переход от простейшего HTML-исходника (а) к его модели в виде дерева (б) и программному представлению (в) в модуле HTML::Element

```

{
    'br' => [...list of all <br> elements...];
    'div' => [...list of all <div> elements...];
    'li' => [...list of all <li> elements...].
}

```

■ **Рис. 2.** Структура ассоциативного массива в модуле HTML::Element

статистика тэгов по каждому сайту сохраняется в отдельный файл со специфическим расширением *.stt, позволяющим отличать его от других.

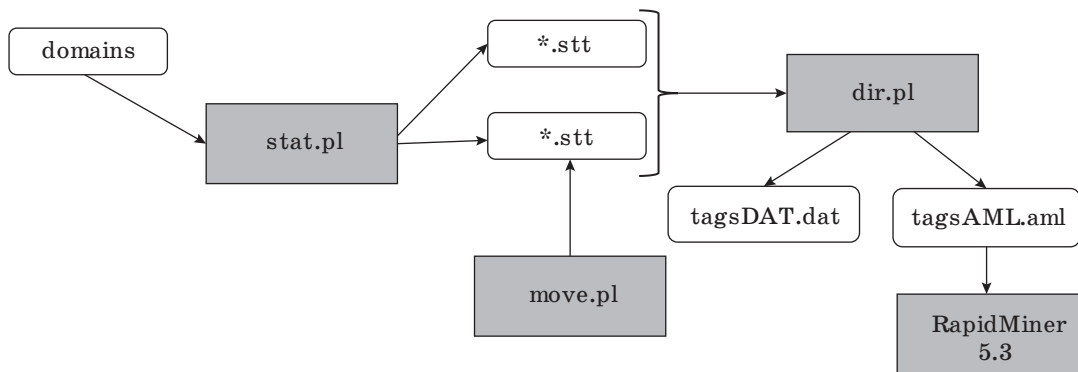
В соответствии с данной архитектурой набор *.stt-файлов попадает на обработку в модуль dir.pl, который из собранных данных выбирает Top-25 тэгов, в разной степени встречающихся на каждом из сайтов в имеющейся выборке.

Так формируется своеобразный базис, по которому раскладывается статистика тэгов каждой конкретной страницы, а соответствующие частоты будут коэффициентами.

Результатом работы модуля являются файлы «tagsDAT.dat» и «tagsAML.aml», необходимые на последующих этапах в программном обеспечении анализа данных RapidMiner 5.3 [20], в котором в виде блоков реализованы все используемые в настоящем исследовании классификаторы.

<body> и т. д., чтобы не добавлять их в стоп-слова).

Архитектура созданной системы представлена на рис. 3. В ней в файле domains содержатся ссылки на сайты, объединенные определенной тематикой (относящиеся к одной категории классификации). Модуль считывает адреса веб-страниц, переходит по каждой из ссылок, и вся



■ **Рис. 3.** Архитектура системы классификации на основе анализа статистики HTML-тэгов

AML-файлы содержит xml-подобный текст с заголовками, а их значения содержатся в DAT-файле. Модуль move.pl служит для перемещения файлов.

Предполагается, что данный подход позволит лучше различать категории, которые обычно путаются при классификации по тексту из-за одинакового смыслового содержания: chat — forum, guns — hunting и т. д.

Результаты экспериментов

Эксперименты проводились на двух наборах данных («set1» и «set2»). Набор «set1» создан на основе исходных данных (файлов domains) с сайта URLBlacklist.com [21], в которые вошли категории «books, hunting, news, dating, guns», для каждой из которых отобрано по 1000 сайтов. Набор «set2» включает в себя следующие источники данных: материалы сайта URLBlacklist.com [21], объединенные с частью категорий, взятых из списков «Shalla Secure Services KG» [22]. Два различных каталога было использовано для того, чтобы выделить общие черты сайтов, а также по причине нехватки исходных данных по определенным категориям в одном источнике и достаточного их количества в другом. Окончательно было выбрано 13 категорий: «books, chat, drugs, forum, guns, hunting, jobsearch, magazines, medical, movies, music, press, webmail», — в каждой из которых около 1500 сайтов.

При подготовке исходных данных уделялось внимание границам категорий. Такие неоднородные категории, как «radio-tv» или «audio-video», исключались из рассмотрения, поскольку фактически каждая из них подразделяется на две. Категории drugs и medical, guns и hunting, наоборот, были взяты специально, чтобы оценить работу в случаях, когда некоторые специфичные слова и сочетания могут быть для них общими.

Результаты экспериментов для первого набора представлены на рис. 4, а. Сравнение результатов классификации по теговым и текстовым признакам для первого набора приведено на рис. 5, а. Результаты экспериментов для второго набора представлены на рис. 4, б. Сравнение результатов классификации по теговым и текстовым признакам для второго набора приведено на рис. 5, б.

По анализу результатов экспериментов можно сделать вывод о невысоком в целом качестве, не позволяющем использовать данный метод как основной инструмент классификации. Набор «set1» дает более высокое значение аккуратности, равное 35,43 %, поскольку содержит меньше «спорных категорий», между которыми возможно пересечение (только guns и hunting). Для набора «set2» аккуратность снижается до 15,08 %, при этом отчетливо видно, что категории press и

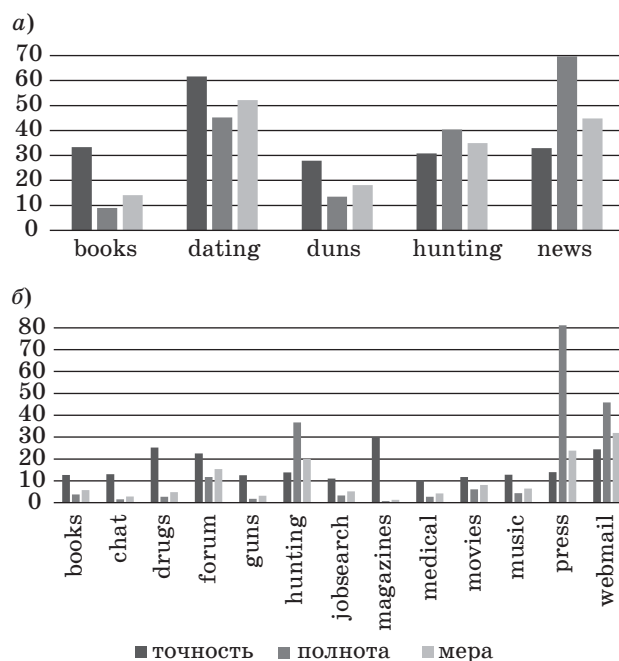


Рис. 4. Значения основных метрик для набора «set1» (а) и «set2» (б)

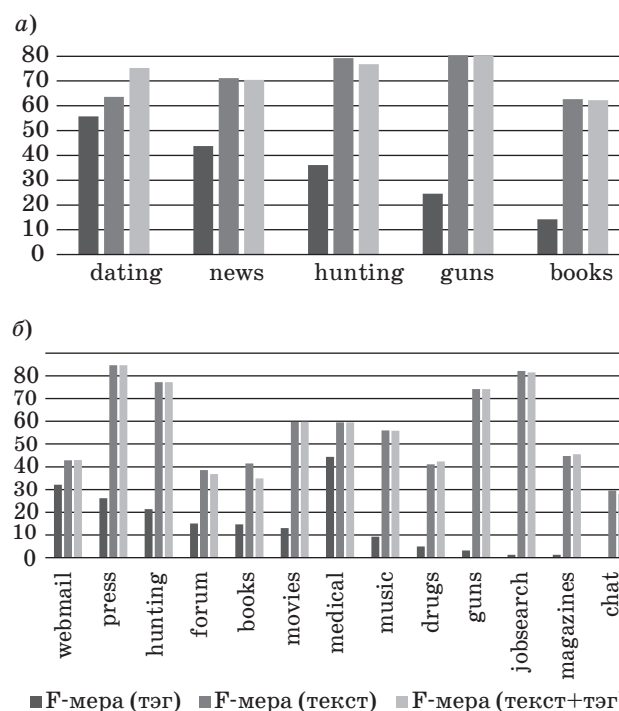
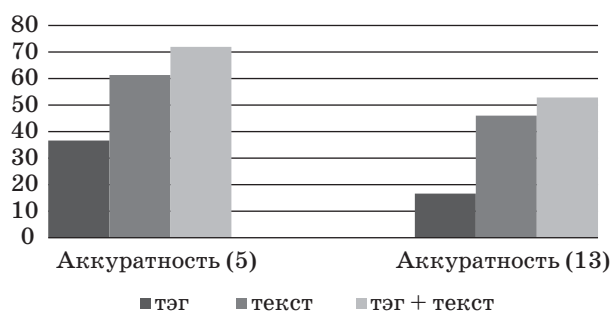


Рис. 5. Категории набора «set1» (а) и «set2» (б), упорядоченные по убыванию F-меры для классификации по тэгам

hunting стали «поглощающими». Эта особенность деревьев решений уже отмечалась выше — к ним верно относятся сайты, действительно входящие в эти категории, но также многие веб-страницы, не являющиеся таковыми.



■ **Рис. 6.** Показатель аккуратности для подходов, основанных на разных признаках и их комбинации

Из рассмотрения результатов при классификации совместно по тэгам и тексту можно заключить, что каждый из подходов позволяет выделить разные категории по критерию максимума F-меры. На наборе «set1» для текста — это *hunting* и *guns*, незначительно отстоящие друг от друга по величине F-меры, что отражает одну из проблем при классификации: на охоте используется оружие, а сайты, торгующие оружием, могут предлагать его для охоты. При использовании статистики тэгов первые места занимают уже другие категории — *dating* и *news*, а различие между *hunting* и *guns* несколько увеличивается. Набор «set2» демонстрирует похожую картину: в лидерах по тексту — *press*, *jobsearch*, *guns* и *hunting*, слабо отличающиеся друг от друга. Применение статистики тэгов выводит на первый план *webmail* и *press* и позволяет улучшить категоризацию для *guns* и *hunting* за счет более сильного различия между ними.

Значения аккуратности для подходов, основанных на анализе тэгов, текста и их комбинации, приведены на рис. 6. Результаты отражают повышение качества классификации при объединении данных подходов как для пяти, так и для 13 категорий.

Таким образом, проведенные исследования показывают, что предложенный подход на основе статистики HTML-тэгов самостоятельно не решает задачи категорирования, но может быть хорошим дополнением к текстовой классификации при выделении категорий, отличающихся по структурным особенностям.

Заключение

В данной статье рассматриваются подходы к категоризации веб-страниц, не обладающих существенными отличиями при текстовой классификации, но имеющих различную структуру. В основе предлагаемого метода лежит использование статистики HTML-тэгов, которая подается на вход классификаторов.

Проведен полный цикл исследований. Эксперименты показали следующие значения аккуратности: 35,43 % для набора «set1» и 13,69 % для набора «set2». Выполнены сравнение результатов классификации на основе тэгов с текстовой классификацией на основе F-меры. Проанализирована комбинированная схема классификации, использующая текстовые и структурные признаки сайта одновременно. Так, для пяти категорий добавление анализа тэгов повысило аккуратность на 10,6 %, а для 13 категорий — на 6,9 %. Полученные результаты свидетельствуют о том, что уровень классификации по тэгам недостаточен для того, чтобы применять данный метод в качестве самостоятельного, однако он может быть использован как полезное дополнение к существующим системам с текстовой классификацией. Исследованные принципы могут применяться для улучшения качества систем защиты от информации, таких как системы родительского контроля. К дальнейшим направлениям исследований можно отнести использование сайта DMOZ.org в качестве источника исходных данных, поскольку применяемые на текущий момент каталоги интернет-ресурсов не обладают достаточным их количеством. Еще одна задача, стоящая на данном этапе, — поиск других классификаторов и их комбинаций, что позволит объединить анализ данных по тексту и статистике тэгов, избавиться от характерных для деревьев решений «поглощающих категорий». Также важна модификация имеющихся схем с целью обеспечить распараллеливание и ускорение анализа данных.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 14-07-00697, 14-07-00417, 15-07-07451, 16-37-00338), Российского научного фонда (проект № 15-11-30029) и при частичной поддержке бюджетных тем № 0073-2015-0004 и 0073-2015-0007.

Литература

1. **Joachims T.** Text Categorization with Support Vector Machines: Learning with Many Relevant Features // Proc. of 10th European Conf. on Machine Learning (ECML-98), Chemnitz, Germany, April 21–23, 1998. P. 137–142.

2. **Ko Y., Seo J.** Automatic Text Categorization by Unsupervised Learning // Proc. of the 18th Conf. on Computational Linguistics (Coling-2000). 2000. P. 453–459.
3. **Ntoulas A., et al.** Detecting Spam Web Pages through Content Analysis/ A. Ntoulas, M. Najork, M. Manasse, D. Fetterly // Proc. of the 15th Intern. World Wide Web Conf. (WWW-2006). 2006. P. 83–92.

4. **Kehagias A.**, et al. A Comparison of Word- and Sense-based Text Categorization Using Several Classification Algorithms/ A. Kehagias, V. Petridis, V. G. Kamburlasos, P. Fragkou // *Journal of Intelligent Information Systems*. 2000. Vol. 21(3). P. 227–247.
5. **Attardi G., Gulli A., Sebastiani F.** Automatic Web Page Categorization by Link and Context Analysis // *Proc. of 1st European Symp. on Telematics, Hypermedia and Artificial Intelligence (THAI-1999)*. 1999. P. 105–119.
6. **Khonji M., Iraqi Y., Jones A.** Enhancing Phishing E-Mail Classifiers: A Lexical URL Analysis Approach // *Intern. Journal for Information Security Research*. 2012. Iss. 6. P. 236–245.
7. **Ma J.**, et al. Beyond Blacklists: Learning to Detect Malicious Web Sites from Suspicious URLs/ J. Ma, L. K. Saul, S. Savage, G. M. Voelker // *Proc. of Conf. on Knowledge Discovery and Data Mining*. 2009. P. 1245–1254.
8. **Kan M.-Y., Thi H. O. N.** Fast Webpage Classification Using URL Features // *Proc. of Conf. on Information and Knowledge Management*. 2005. P. 325–326.
9. **Geide M.** N-gram Character Sequence Analysis of Benign vs. Malicious Domains/URLs. http://analysis-manifold.com/ngram_whitepaper.pdf (дата обращения: 24.03.2016).
10. **Patil A. S., Pawar B. V.** Automated Classification of Web Sites Using Naive Bayesian Algorithm // *Proc. of the Intern. Multiconf. of Engineers and Computer Scientists*. 2012. P. 466.
11. **Riboni D.** Feature Selection for Web Page Classification // *Proc. of the Workshop on Web Content Mapping: A Challenge to ICT (EURASIA-ICT)*. 2002. P. 121–128.
12. **Kotenko I.**, et al. Analysis and Evaluation of Web Pages Classification Techniques for Inappropriate Content Blocking/ I. Kotenko, A. Chechulin, A. Shorov, D. Komashinsky // *Proc. of 14th Industrial Conf. on Data Mining (ICDM 2014)*. 2014. P. 39–54.
13. **Meshkizadeh S., Masoud-Rahmani A.** Webpage Classification Based on Compound of Using HTML Features & URL Features and Features of Sibling Pages // *Intern. Journal of Advanced Computer Technology*. 2010. Iss. 2(4). P. 36–46.
14. **Novozhilov D., Kotenko I., Chechulin A.** Improving the Categorization of Web Sites by Analysis of Html-Tags Statistics to Block Inappropriate Content // *Proc. of the 9th Intern. Symp. on Intelligent Distributed Computing (IDC-2015), Guimaraes, Portugal, October 7–9, 2015*. 2016. P. 257–263. doi:10.1007/978-3-319-25017-5_24
15. **Kotenko I., Chechulin A., Komashinsky D.** Evaluation of Text Classification Techniques for Inappropriate Web Content Blocking // *Proc. of the IEEE 8th Intern. Conf. on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS-2015), Warsaw, Poland, Sept. 24–26, 2015*. 2015. P. 412–417.
16. **Котенко И. В., Чечулин А. А., Комашинский Д. В.** Автоматизированное категорирование веб-сайтов для блокировки веб-страниц с неприемлемым содержанием // *Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы*. 2015. № 2. С. 69–79.
17. **Комашинский Д. В., Котенко И. В., Чечулин А. А.** Категорирование веб-сайтов для блокирования веб-страниц с неприемлемым содержанием // *Системы высокой доступности*. 2011. № 2. С. 102–106.
18. **Комашинский Д. В.** и др. Автоматизированная система категорирования веб-сайтов для блокирования веб-страниц с неприемлемым содержанием/ Д. В. Комашинский, И. В. Котенко, А. А. Чечулин, А. В. Шоров // *Системы высокой доступности*. 2013. № 3 (9). С. 119–127.
19. **RapidMiner Operator Reference Guide**. <http://docs.rapidminer.com/studio/operators/> (дата обращения: 24.03.2016).
20. **RapidMiner 5.3**. <http://rapidminer.com/> (дата обращения: 24.03.2016).
21. **URLBlacklist**. <http://urlblacklist.com/> (дата обращения: 24.03.2016).
22. **Shalla Secure Services KG**. <http://www.shallalist.de/> (дата обращения: 24.03.2016).

UDC 004.89

doi:10.15217/issn1684-8853.2016.6.65

Improving Website Categorization Based on HTML Tag Statistics for Blocking Unwanted ContentNovozhilov D. A.^{a,b}, Student, novozhilov@comsec.spb.ruChechulin A. A.^a, PhD, Tech., Senior Researcher, chechulin@comsec.spb.ruKotenko I. V.^a, Dr. Sc., Tech., Professor, ivkote@comsec.spb.ru^aSaint-Petersburg Institute for Informatics and Automation of the RAS, 39, 14 Line, V. O., 199178, Saint-Petersburg, Russian Federation^bSaint-Petersburg State Electrotechnical University «LETI», 5, Prof. Popov St., 197376, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: The continuous development and ubiquity of the Internet lead to a higher complexity of detecting unwanted and malicious information. The existing systems usually use automatic classification by textual content of websites, but this approach cannot be applied to websites with changeable content like news, forums, etc. **Purpose:** The goal is to enhance the protection against unwanted

or inappropriate information through improving the categorization quality by using Data Mining techniques for automated parental control systems. **Results:** Improved algorithms have been developed for website classification, along with a prototype of a parental control system. The novelty of the proposed approach is using not the textual content but the statistics of HTML tags (the ratio of the number of occurrences of a certain tag on a page to the total number of all tags on this page). The algorithm selects 25 main tags from a set of websites and then calculates tags' statistics for each website. The paper also describes the architecture of the categorization system which consists of several Perl modules and special RapidMiner software. For the developed prototype, some experiments on preformed datasets were carried out, with the comparison of categorization quality between text, structure features and their combinations. The results showed that the analysis of tag statistics is not sufficient to replace all the other methods. But it can be a useful complement to the existing systems with textual classification, able to increase their quality from 6.9 to 10.6% in accuracy metrics, depending on the number of categories. **Practical relevance:** This approach can be used to improve the efficiency of search for information forbidden by the laws of the Russian Federation (propaganda of extremism, pornography, drugs, anti-social behavior, etc). Also, this approach can be used in parental control systems to deny access to certain types of information according to age categories.

Keywords — Data Mining, Data Analysis, Protection from Information, Website Categorization, HTML Tag Analysis, Tag Statistics.

References

1. Joachims T. Text Categorization with Support Vector Machines: Learning with Many Relevant Features. *Proc. of 10th European Conf. on Machine Learning (ECML-98)*, Chemnitz, Germany, April 21–23, 1998, pp. 137–142.
2. Ko Y., Seo J. Automatic Text Categorization by Unsupervised Learning. *Proc. of the 18th Conf. on Computational Linguistics (Coling-2000)*, 2000, pp. 453–459.
3. Ntoulas A., Najork M., Manasse M., Fetterly D. Detecting Spam Web Pages through Content Analysis. *Proc. of the 15th Intern. World Wide Web Conf. (WWW-2006)*, 2006, pp. 83–92.
4. Kehagias A., Petridis V., Kaburlasos V. G., Fragkou P. A Comparison of Word- and Sense-based Text Categorization Using Several Classification Algorithms. *Journal of Intelligent Information Systems*, 2000, vol. 21(3), pp. 227–247.
5. Attardi G., Gulli A., Sebastiani F. Automatic Web Page Categorization by Link and Context Analysis. *Proc. of 1st European Symposium on Telematics, Hypermedia and Artificial Intelligence (THAI-1999)*, 1999, pp. 105–119.
6. Khonji M., Iraqi Y., Jones A. Enhancing Phishing E-Mail Classifiers: A Lexical URL Analysis Approach. *Intern. Journal for Information Security Research*, 2012, iss. 6, pp. 236–245.
7. Ma J., Saul L. K., Savage S., Voelker G. M. Beyond Blacklists: Learning to Detect Malicious Web Sites from Suspicious URLs. *Proc. of Conf. on Knowledge Discovery and Data Mining*, 2009, pp. 1245–1254.
8. Kan M.-Y., Thi H. O. N. Fast Webpage Classification Using URL Features. *Proc. of Conf. on Information and Knowledge Management*, 2005, pp. 325–326.
9. Geide M. *N-gram Character Sequence Analysis of Benign vs. Malicious Domains/URLs*. Available at: http://analysis-manifold.com/ngram_whitepaper.pdf. (accessed 24 March 2016).
10. Patil A. S., Pawar B. V. Automated Classification of Web Sites Using Naive Bayesian Algorithm. *Proc. of the Intern. Multi-conf. of Engineers and Computer Scientists*, 2012, p. 466.
11. Riboni D. Feature Selection for Web Page Classification. *Proc. of the Workshop on Web Content Mapping: A Challenge to ICT (EURASIA-ICT)*, 2002, pp. 121–128.
12. Kotenko I., Chechulin A., Shorov A. Komashinsky D. Analysis and Evaluation of Web Pages Classification Techniques for Inappropriate Content Blocking. *Proc. of 14th Industrial Conf. on Data Mining (ICDM 2014)*, 2014, pp. 39–54.
13. Meshkizadeh S., Masoud-Rahmani A. Webpage Classification Based on Compound of Using HTML Features & URL Features and Features of Sibling Pages. *Intern. Journal of Advanced Computer Technology*, 2010, iss. 2(4), pp. 36–46.
14. Novozhilov D., Kotenko I., Chechulin A. Improving the Categorization of Web Sites by Analysis of Html-Tags Statistics to Block Inappropriate Content. *Proc. of the 9th Intern. Symp. on Intelligent Distributed Computing (IDC-2015)*, Guimaraes, Portugal, October 7–9, 2015, 2016, pp. 257–263. doi:10.1007/978-3-319-25017-5_24
15. Kotenko I., Chechulin A., Komashinsky D. Evaluation of Text Classification Techniques for Inappropriate Web Content Blocking. *Proc. of the IEEE 8th Intern. Conf. on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS-2015)*, Warsaw, Poland, September 24–26, 2015, pp. 412–417.
16. Kotenko I., Chechulin A., Komashinsky D. Automated Categorization of Web-sites for Inappropriate Content Blocking. *Problemy informatsionnoi bezopasnosti. Komp'iuternye sistemy* [Problems of Information Security. Computer Systems], 2015, no. 2, pp. 69–79 (In Russian).
17. Komashinskiy D., Kotenko I., Chechulin A. Categorization of Web Sites for Inadmissible Web Pages Blocking. *Sistemy vysokoy dostupnosti* [High Availability Systems], 2011, no. 2, pp. 102–106 (In Russian).
18. Komashinskiy D., Kotenko I., Chechulin A., Shorov A. Automatic System for Categorization of Websites for Blocking Web Pages with Inappropriate Contents. *Sistemy vysokoy dostupnosti* [High Availability Systems], 2013, no. 3 (9), pp. 119–127 (In Russian).
19. *RapidMiner Operator Reference Guide*. Available at: <http://docs.rapidminer.com/studio/operators/> (accessed 24 March 2016).
20. *RapidMiner 5.3*. Available at: <http://rapidminer.com/> (accessed 24 March 2016).
21. *URLBlacklist*. Available at: <http://urlblacklist.com/> (accessed 24 March 2016).
22. *Shalla Secure Services KG*. Available at: <http://www.shallalist.de/> (accessed 24 March 2016).

РЕАЛИЗАЦИЯ СУПЕРКОМПЬЮТЕРОВ С ДИНАМИЧЕСКОЙ АРХИТЕКТУРОЙ НА СОВРЕМЕННОЙ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЕ

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 обладают рядом недостатков по технико-экономическим характеристикам, кроме того, производительность суперкомпьютеров при решении реальных задач оказывается значительно ниже, чем их теоретическая производительность. **Цель:** разработка принципов создания суперкомпьютеров на основе динамических автоматных сетей, включая различные варианты схмотехнических решений, позволяющих существенно улучшить удельные характеристики суперкомпьютеров. **Результаты:** сформулированы базовые принципы создания суперкомпьютеров с динамической архитектурой на основе динамических автоматных сетей, включая реализацию динамических автоматов с использованием программируемых логических интегральных схем и специально разрабатываемых отечественных больших интегральных схем, которые обеспечивают крайне высокую регулярность структуры микросхем и модулей вычислительной системы, что существенно упрощает создание суперкомпьютеров с динамической архитектурой по сравнению с традиционными суперкомпьютерами и позволяет значительно улучшить такие их характеристики, как габариты, энергопотребление и стоимость. **Практическая значимость:** полученные результаты дают возможность намного сократить сроки и стоимость разработки вычислительных систем со сколь угодно высокой производительностью, обеспечивая при этом неограниченную масштабируемость, крайне высокую надежность и информационную безопасность таких систем.

Ключевые слова — динамические автоматные сети, суперкомпьютеры с динамической архитектурой, элементная база суперкомпьютеров.

Введение

Все современные суперкомпьютеры, или, как их иногда называют, «вычислительные суперсистемы», построены на основе существующих микропроцессоров, большей частью Intel, Sun Microsystems (Sparc), NEC и некоторых других, а также акселераторов на основе графических процессоров, преимущественно фирмы NVIDIA. Общим для всех этих процессоров является то, что они построены на традиционной, или, как ее еще называют, фон-неймановской архитектуре, основанной на алгоритмической, т. е. последовательной модели вычислений. Поскольку основной проблемой при реализации суперкомпьютеров является достижение максимально возможной вычислительной мощности, которая определяется как временем выполнения операций, так и доступными объемами и скоростью работы памяти, то основные достижения в этой сфере до недавнего времени основывались на увеличении тактовой частоты микропроцессоров (уменьшении времени выполнения операций). Это порождало также ряд проблем, приводивших к все большему увеличению сложности самих процессоров и сопутствующих им устройств (памяти, шин, конвейеров и т. п.). В настоящее время увеличение тактовой частоты почти достигло барьера, вызванного чисто физическими причинами, частота работы процессоров практически не увеличивается уже более десяти лет. Дальнейшее увеличение производительности процессоров достигалось в основном за счет увеличения слож-

ности их архитектуры, создания многоядерных процессоров и других решений, которые только увеличивали сложность программного обеспечения (для эффективного использования многоядерных процессоров требуются специальные, достаточно сложные приемы программирования, которые в большинстве программ не используются). Кроме того, увеличение сложности архитектуры процессоров приводит к тому, что все меньшая часть аппаратуры выполняет собственно вычисления, а остальная часть обслуживает дополнительные архитектурные усложнения.

В связи с этим становится ясно, что дальнейшее увеличение производительности суперкомпьютеров возможно только на основе кардинальных изменений в их архитектуре либо в отказе от традиционных принципов построения компьютеров, т. е. в изменении самой модели вычислений. В статье Ю. Н. Митропольского [1], посвященной новым концепциям построения вычислительных суперсистем, с одной стороны, подтверждается то, что было сказано выше, с другой стороны, рассматривается ряд возможных концепций архитектуры, таких как «мультиархитектура», которая предусматривает построение всей системы на основе неоднородной структуры, содержащей специализированные процессоры, ориентированные на выполнение отдельных функций в системе. Рассматриваются также некоторые решения, основанные на изменениях топологии микросхем, уменьшающих время распространения сигналов и обращений к памяти, а также решения, основанные на взаимной адаптации аппаратуры

и программного обеспечения. Рассмотренные концепции за счет специализации позволяют существенно упростить архитектуру отдельных процессоров, но при этом усложняется структура суперсистемы в целом, а также программное обеспечение. Все эти решения выполняются в рамках все той же алгоритмической, последовательной модели вычислений.

Альтернативой традиционной модели являются автоматные сети, предложенные тем же фон-Нейманом в его известной работе о самовоспроизводящихся автоматах [2]. Автоматные сети бывают стационарными, перестраиваемыми и динамическими. На базе программно-перестраиваемых автоматных сетей основаны разработки Научно-исследовательского института мультипроцессорных вычислительных систем Южного федерального университета (НИИ МВС ЮФУ). Данные идеи, впервые изложенные в работах А. В. Каляева [3], развиваются до настоящего времени И. А. Каляевым и его коллегами [4]. В принципе эти разработки позволяют существенно улучшить характеристики мультипроцессорных систем, повышают гибкость архитектуры, поскольку так же, как и рассматриваемые в данной статье, реализуются с использованием программируемых логических интегральных схем (ПЛИС). Однако в архитектуре отдельных процессоров все так же доминирует традиционная алгоритмическая архитектура, но при этом реализация перестраиваемых автоматных сетей требует также достаточно сложного программного обеспечения, причем перестройка автоматной сети осуществляется однократно, перед решением задачи.

Динамические автоматные сети (ДАС) были предложены нами в 80-х гг. прошлого века как теоретическая модель, альтернативная традиционным моделям фон-Неймана и Тьюринга, для представления разнообразных вычислений, в том числе и параллельных, выполняемых в различных распределенных вычислительных средах. Основное отличие ДАС от стационарных и программно-перестраиваемых автоматных сетей заключается в том, что в процессе вычислений ДАС постоянно изменяет свою конфигурацию за счет порождения новых динамических автоматов (ДА), уничтожения ДА, выполнивших свою функцию, а также за счет изменения связей между автоматами. Этот процесс называется «автотрансформацией ДАС». В то же время стационарные автоматные сети принципиально не могут изменять свою конфигурацию, а конфигурация программно-перестраиваемых сетей может быть изменена (перепрограммирована) только один раз, перед решением конкретной задачи. При практической реализации некоторая начальная ДАС по сути является представлением программы для решения какой-либо задачи,

а традиционные последовательные программы, основанные на алгоритмической модели, не применяются.

Динамическая автоматная сеть изменяется до тех пор, пока не потеряет способности к автотрансформации, что происходит при исчезновении активных элементов (автоматов), которые способны порождать новые ДА или подсети. При этом такое неизменяемое состояние ДАС представляет собой некоторую структуру из пассивных элементов, т. е. данных, которая и является решением задачи. Эта структура данных может быть некоторым образом выведена во внешнюю среду, т. е. записана в файл на жестком диске, выведена в удобное для восприятия результатов виде на экран дисплея, на печать и т. д.

Каждый ДА представляет собой конечный автомат, дополненный множеством связей с другими автоматами, которые называются «смежными», а также так называемой «функцией связей» (или множеством таких функций). Последняя как раз и предназначена для порождения или уничтожения ДА, а также для изменения связей между автоматами в ДАС. В общем случае любой ДА может быть отнесен к одному из двух классов: «операционный автомат», выполняющий некоторую вычислительную функцию, и «ресурсный автомат», представляющий данные.

Теоретическая модель ДАС может быть использована на практике для реализации различных высокопроизводительных вычислительных систем, включая распределенные вычислительные системы. Наиболее перспективным направлением является реализация суперкомпьютеров с динамической архитектурой (СКДА), удельные характеристики которых, такие как энергопотребление, габариты и стоимость, оказываются в десятки, а то и в сотни раз меньшими, чем соответствующие характеристики существующих суперкомпьютеров при сопоставимой производительности. Основная причина этого заключается в том, что в СКДА не используются сложные последовательные программируемые процессоры, не используются высокие тактовые частоты, при которых аппаратура требует мощной системы охлаждения, а используются весьма простые по структуре и функциям автоматы. Число ДА, реализуемых в одной микросхеме, в зависимости от применяемой элементной базы и конкретных архитектурных и схемотехнических решений может составлять сотни тысяч или миллионы, при этом все автоматы работают параллельно, полностью асинхронно и не требуют никакого централизованного управления. Другим важным свойством СКДА, отличающим их от суперкомпьютеров с традиционной архитектурой, является неограниченная масштабируемость, дающая возможность наращивать вычислительную

мощность без каких бы то ни было изменений в структуре как аппаратуры, так и программного обеспечения.

Более подробные варианты рассмотрения модели ДАС, а также структуры и функций отдельных ДА можно найти в работах [5–9].

Возможность реализации компьютеров на основе модели ДАС и их высокая эффективность впервые были показаны на примере спроектированной, изготовленной и прошедшей государственные испытания «машины с динамической архитектурой» (МДА) ЕС-2704 в конце 80-х гг. Во время испытаний, проходивших в Научно-исследовательском центре электронной вычислительной техники (НИЦЭВТ, Москва), где МДА и была изготовлена, ряд тестовых задач выполнялся как на МДА, так и на типовой для того времени вычислительной машине ЕС-1055. При этом МДА показала в десятки и сотни раз более высокую производительность в зависимости от решаемой задачи, чем ЕС-1055, притом что она была выполнена на той же элементной базе и в том же конструктивном оформлении, что и ЕС-1055, занимая при этом всего одну стандартную стойку ЕС ЭВМ. Производительность сравнивалась не по скорости выполнения отдельных операций, а по времени решения задачи в целом. Было выпущено несколько экземпляров ЕС-2704, которые успешно работали в ряде организаций СССР.

Однако с тех пор элементная база и некоторые архитектурные и технические решения устарели. В 90-х гг. и позднее вся вычислительная техника в мире была ориентирована, как было указано выше, на типовые микропроцессоры, которые не позволяют реализовать ДАС иначе, чем посредством программно-аппаратной эмуляции, что не обеспечивает требуемую эффективность. Появление в середине 90-х гг. ПЛИС, а также их развитие в настоящее время способствуют возвращению к идее МДА с использованием всех преимуществ ДАС и МДА, дающих возможность получить в десятки и сотни раз большую производительность, чем при использовании традиционной архитектуры, при том же объеме аппаратных средств.

Данная статья посвящена некоторым аспектам современной реализации и применения вычислительных систем на основе ДАС.

Варианты реализации СКДА на современной элементной базе

Поскольку ДАС могут включать в свой состав любое, сколь угодно большое число автоматов, то и СКДА должен иметь возможность включать в свой состав произвольное число устройств, обеспечивающих реализацию автоматов. Во избежание терминологической путаницы элементы

ДАС будем называть динамическими автоматами, а элементы СКДА — физическими или функциональными автоматами (ФА). Каждый ФА может находиться в занятом или свободном состоянии. ФА является занятым, если в нем размещается ДА, определяющий функцию, которую выполняет ФА. Любой ДА представлен в СКДА в виде информационного пакета определенной структуры, одинаковой для любых типов ДА. Информация, включая фрагменты программы, в СКДА представлена исключительно в форме ДА, что обеспечивает высокий уровень информационной безопасности. Последнее обеспечивается тем, что любой ДА, включенный в ДАС, доступен для использования или изменения только смежным элементам ДАС. Это определяется структурой сетевой программы и ничем другим. В принципе возможно одновременное выполнение нескольких программ, представленных в форме ДАС, в одном СКДА, но элементы этих различных программ никак между собой не связаны и никаким образом не могут получить доступ к элементам другой программы. Это обеспечивается посредством особой организации адресного пространства памяти, позволяющей адресовать в данном автомате только элементы (дескриптор и тело) данного автомата и автоматов, смежных с ним.

На абстрактном уровне СКДА можно представить как множество одинаковых ФА, образующих регулярную двумерную структуру, каждый элемент которой соединен с четырьмя соседями. Каждое соединение является многоканальным, причем каналы распределяются как в пространстве, так и во времени. Каждый ФА, независимо от его состояния, обеспечивает автоматическое динамическое распределение и коммутацию проходящих через него каналов и передачу по этим каналам информационных пакетов, соответствующих ДА.

Такие фундаментальные свойства ДАС, как порождение и уничтожение ДА, в СКДА реализуются достаточно просто. Если некоторый ДА решит создать потомков, то ФА, в котором он находится, устанавливает связь с ближайшим свободным ФА и передает туда модифицированную копию родителя, после чего потомок начинает самостоятельную деятельность. Для ликвидации ДА после завершения выполняемой функции или истечения времени жизни, определенного при рождении, ДА разрывает все связи с другими ДА, включая родителя. При этом ФА переходит в свободное состояние, стирая информацию о погибшем ДА. ДА может быть уничтожен принудительно, если все ДА, связанные с ним, разорвут свои связи. В каждом ФА имеются механизмы, позволяющие выявлять и обрывать случайно сохранившиеся связи.

Далее рассмотрим варианты реализации МДА на базе современных технологий. Следует отметить, что, наряду с суперкомпьютерами, на основе ДАС возможно создание и небольших компьютеров с динамической архитектурой для конкретных применений, для обозначения которых будем употреблять исторически устоявшийся термин «машина с динамической архитектурой». Далее в тексте статьи можно считать термины «СКДА» и «МДА» эквивалентными, разумеется, имея в виду, что «суперкомпьютерами» все же называются высокопроизводительные системы.

Реализация МДА на базе ПЛИС

Для создания МДА любой производительности и различного назначения, начиная от небольших, но мощных бортовых систем и кончая стационарными суперкомпьютерами, достаточно использовать лишь два типа модулей: вычислительный модуль с динамической архитектурой (ВМДА) и интерфейсный модуль с динамической архитектурой (ИМДА). Далее в данном разделе имеется в виду реализация на основе вполне определенных микросхем — ПЛИС фирмы Altera, о выборе которых речь пойдет ниже, но вышеприведенные соображения о структуре реализации справедливы и для любых других вариантов реализации, включая рассмотренные в следующем разделе.

Любой из этих модулей, реализуемый на современной элементной базе, размещается на печатной плате размером 110×110 мм. На каждой стороне печатной платы размещаются два одноэлементных (one-piece) разъема размерами 45×10 мм и с 60 линиями подключения. Разъемы используются для соединения между собой печатных плат. На одну печатную плату устанавливается разъем, а вторая печатная плата привинчивается к разъему так, чтобы имеющиеся на ее поверхности контактные площадки попали на пружинные контакты разъема.

На плате ВМДА устанавливаются четыре ПЛИС, каждая из которых соединена с двумя другими ПЛИС и с двумя разъемами. К каждой ПЛИС подключается динамическая память и энергонезависимая память, обеспечивающая настройку ПЛИС и хранение данных.

На плате ИМДА устанавливаются две ПЛИС, энергонезависимая память, обеспечивающая настройку ПЛИС, и два дополнительных одноэлементных разъема, на которые в мезонинном стиле устанавливается плата интерфейсного блока ДА. Одна из ПЛИС ИМДА соединена со всеми восьмью основными разъемами модуля, а также со второй ПЛИС и выполняет исключительно коммутационные функции. В этом плане она полностью эквивалентна четырём ПЛИС

ВМДА. Вторая ПЛИС является контроллером интерфейсного блока. Интерфейсный блок может иметь множество разновидностей в зависимости от вида входной и выходной информации (цифровая или аналоговая), от способов физического преобразования сигналов (гальваническая развязка, преобразование уровней напряжения), от типа внешних устройств (цифровые каналы, видеокамеры, радиолокационные или гидроакустические станции, датчики и устройства управления для автоматических систем и т. д.). Как один из вариантов интерфейсного блока можно рассматривать обычный микропроцессор, выполняющий последовательные программы, не требующие высокой производительности. ВМДА и ИМДА могут входить в состав МДА в любом соотношении. Как вырожденный случай можно представить МДА, содержащий только интерфейсные модули с микропроцессорными блоками. В такой МДА может одновременно выполняться большое число обычных последовательных программ. При этом сохраняются такие свойства МДА, как сверхвысокая надежность и информационная безопасность.

Соединение модулей в горизонтальной плоскости выполняется с помощью печатных плат размерами 45×20 мм, привинчивающихся к одноэлементным разъемам смежных модулей. Для вертикальных соединений используются гибкожесткие платы двух типов с длиной гибкой части 40 и 90 мм соответственно при условии, что межмодульное расстояние по вертикали составляет 25 мм. Жесткие части этих плат привинчиваются к разъемам модулей, расположенных друг над другом либо непосредственно, либо минуя два модуля. Для вертикального крепления используются разборные стойки, расположенные по четырем углам каждого модуля.

Структура МДА, как и любой ее части (модуля, платы), в высшей степени регулярна, независимо от конкретной реализации. С одной стороны, это сильно упрощает процесс проектирования конкретной аппаратной реализации, с другой стороны, не имеет смысла иллюстрировать эти структуры рисунками, поскольку любой из них будет содержать некоторую матрицу из прямоугольных элементов (представляющих собой различные автоматы), соединенных горизонтальными и вертикальными стрелками, так что не будет особенно информативным.

Определимся теперь с выбором ПЛИС для реализации МДА. У фирмы Altera имеется два больших семейства ПЛИС: высокопроизводительные микросхемы серии Stratix IV, выполненные по технологии 40 нм, и дешевые (так их называют в самой фирме Altera) микросхемы серии Cyclone IV, выполненные по технологии 60 нм. В каждое семейство входит полтора десятка микросхем, отли-

чающихся по числу транзисторов и по архитектуре. При сравнении наиболее мощных представителей каждого семейства EP4S100G5 (Stratix IV) и EP4CGX150 (Cyclone IV) можно заметить следующее: первая микросхема имеет производительность в 6 раз выше и стоимость в 50 раз больше. При сравнении других представителей семейств это соотношение сохраняется. Таким образом, экономическая эффективность семейства Stratix на порядок ниже, чем у Cyclone. Поскольку производительность МДА обеспечивается в первую очередь за счет количества автоматов (и, соответственно, ПЛИС), а не скорости их работы, то выбор в пользу семейства Cyclone становится очевидным. Хотя во всем мире при создании высокопроизводительных вычислительных устройств на ПЛИС однозначный выбор делается в пользу семейства Stratix или аналогичных микросхем семейства Virtex фирмы Xilinx.

Наибольшей экономической эффективностью среди ПЛИС семейства Cyclone обладает микросхема EP4CE40. При рабочей частоте 250 МГц обеспечивается производительность 58 Гфлопс при операциях с плавающей запятой. При обработке цифровых сигналов, например с помощью алгоритмов быстрого преобразования Фурье, производительность ПЛИС возрастает в 3 раза и составляет 174 млрд арифметических операций в секунду. Относительно небольшое энергопотребление микросхемы (менее 2 Вт при максимальной загрузке всех автоматов) позволяет обойтись без принудительного охлаждения. Следует заметить, что энергопотребление ПЛИС пропорционально числу одновременно работающих автоматов. Если загрузка автоматов и, соответственно, производительность уменьшаются в несколько раз, то во столько же раз падает и энергопотребление.

В целом модуль ВМДА обеспечивает производительность 232 Гфлопс при энергопотреблении не более 10 Вт. Объем оперативной памяти модуля составляет 2 ГБ. Объем энергонезависимой памяти — 16–128 ГБ в зависимости от типа установленных микросхем. Пропускная способность коммуникационных каналов ВМДА, а также ИМДА — 12 ГБ/с. Пропускная способность оперативной памяти ВМДА — 16 ГБ/с. Минимальная МДА состоит из двух модулей, один из которых должен быть интерфейсным.

Итак, впервые в истории вычислительной техники у пользователя появляется возможность самому создавать вычислительное устройство с любой сколь угодно большой производительностью, с различными типами интерфейсов в сочетании со сверхвысокой надежностью и информационной безопасностью. Устройство создается на базе небольшого набора комплектующих, включающего ВМДА, ИМДА, один или несколько типов

интерфейсных блоков, три типа соединительных печатных плат, разборные стойки, элементы корпуса. Для сборки МДА любых размеров требуется лишь отвертка для привинчивания соединительных плат к разъемам и элементов корпуса к стойкам и гаечный ключ для завинчивания стоек. Полный комплект программного обеспечения МДА находится в энергонезависимой памяти каждого из поставляемых ВМДА или ИМДА. В комплект поставки включается также пакет программ для терминального компьютера, обеспечивающий взаимодействие пользователя с МДА.

Машина с динамической архитектурой может применяться для обработки информации непосредственно на борту космического аппарата или беспилотного летательного аппарата. Учитывая суперкомпьютерную производительность даже небольших МДА, состоящих всего из нескольких модулей, можно существенно сократить объем передаваемой на Землю информации, выполняя частичную или полную обработку этой информации непосредственно на борту.

Необходимо отметить, что любая МДА является не только высокопроизводительным вычислительным устройством, но и мощным коммуникационным узлом, способным коммутировать большое число различных цифровых каналов со скоростями до 3,125 ГБ/с. Поэтому МДА может эффективно использоваться в узлах любых информационных сетей, обеспечивая не только коммутацию каналов, но и обработку информации.

Возможности создания МДА на отечественной элементной базе

Описанная выше реализация МДА на базе ПЛИС имеет как некоторые достоинства, так и недостатки. К первым можно отнести относительную легкость проектирования (в том числе программирования ПЛИС), возможность приобретения и использования уже существующих микросхем, не слишком дорогих, учитывая приведенный выше выбор ПЛИС. К недостаткам можно отнести, во-первых, необходимость использования импортных микросхем, что не всегда желательно, например, для систем оборонного назначения. Во-вторых, существенным недостатком является некоторая избыточность ПЛИС, связанная с гибкостью их структуры и возможностью программирования этой структуры. Значительная часть элементов ПЛИС предназначена как раз для этого.

Далее рассмотрим возможность реализации МДА на основе отечественной элементной базы. При этом имеется в виду не использование существующих отечественных микросхем, а проектирование и изготовление БИС, специально предназначенных для реализации МДА. Такой под-

ход позволяет избавиться от обоих недостатков использования ПЛИС, указанных выше, существенно увеличивает эффективность реализации МДА и позволяет еще более повысить удельные характеристики реализации. Анализируется реализация с использованием технологий, доступных в настоящее время в нашей стране.

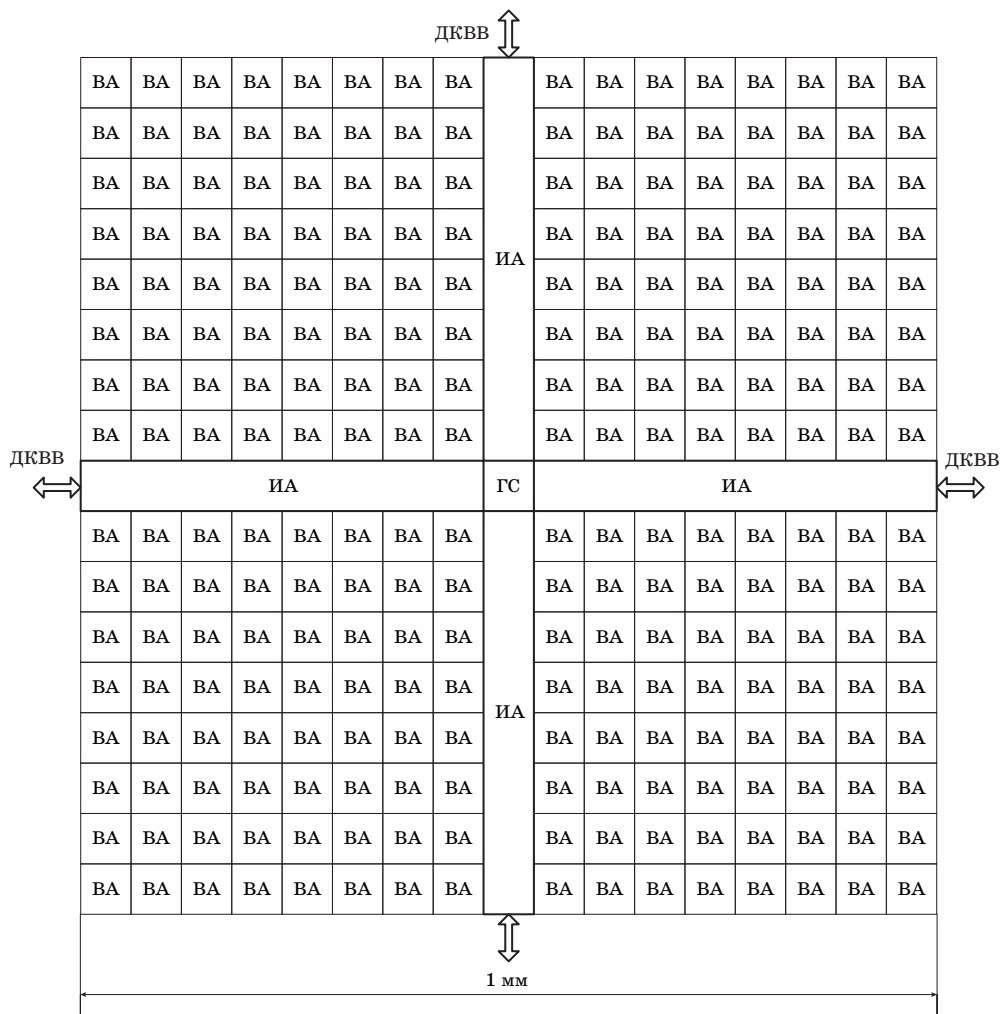
Исследуем непосредственную реализацию МДА в микроэлектронной структуре. Назовем двумерную структуру, содержащую $N \times N$ автоматов ФА и выполненную в виде микросхемы, динамической электронной структурой с размерностью N (ДЭС- N). Например, микросхема ДЭС-32 содержит 1024 автомата ФА, образующих структуру 32×32 .

Поскольку внешние выводы размещаются по краям структуры, естественным является применение планарного корпуса с расстоянием между выводами 0,5 мм. Для соединения между ФА используются дуплексные последовательные каналы с двумя физическими линиями. Крайним ФА соответствуют два внешних вывода корпуса (для

угловых ФА — четыре вывода). Соответственно ФА на кристалле занимает площадь ровно 1 мм^2 , а площадь микросхемы ДЭС-32 составляет 1024 мм^2 , независимо от используемой технологии.

Каждый автомат ФА содержит 256 вычислительных автоматов ВА, четыре интерфейсных автомата ИА и генератор синхроимпульсов ГС; по границам ФА проходят двухпроводные дуплексные каналы ввода-вывода ДКВВ. Примерное размещение элементов ФА показано на рисунке.

В состав каждого ВА входят следующие устройства: перепрограммируемое запоминающее устройство типа флеш-памяти, оперативное запоминающее устройство динамического типа и процессор, состоящий из примитивного операционного устройства и устройства управления. Операционное устройство осуществляет последовательную побитовую обработку информации. Простые операции типа сложения выполняются за n тактов, где n — число двоичных разрядов. Для выполнения операций умножения и деления требуется n^2 тактов.



■ Структура функционального автомата

Работа всех устройств, входящих в состав ФА, осуществляется синхронно с помощью ГС. С максимальной частотой f_{\max} работает операционное устройство каждого ВА. На этой же частоте осуществляется передача информации по последовательным каналам между ИА. Передача информации между ВА, между ВА и ИА, а также между процессором и устройствами памяти в каждом ВА осуществляется по последовательным каналам с частотой в 16 раз более низкой, чем f_{\max} .

Запоминающие устройства занимают 98 % от объема (числа транзисторов) ВА. Менее 1 % объема процессора (1/5000 от объема ВА) составляет операционное устройство. Однако на это устройство, несмотря на его пренебрежимо малые размеры, приходится более 98 % всего энергопотребления ВА. Поэтому величина энергии, потребляемой ФА, определяется числом активных ВА, занятых вычислениями. Свободный автомат или занятый, но ожидающий получения данных, практически не потребляет энергии.

Каждый ВА связан с четырьмя соседями. Однако у крайних автоматов в матрице имеются лишь три соседа, а у угловых автоматов — лишь два. Обычно каналы, соответствующие отсутствующим связям, остаются неиспользованными. Но в микросхеме ДЭС-1 все неиспользованные связи подаются на внешние выводы микросхемы. Четыре основных канала ФА используются для соединения с другими элементами МДА, а 64 дополнительных канала — для подключения к внешним устройствам либо напрямую, либо с помощью интерфейсного блока. Эти каналы разбиты на четыре банка, по 16 каналов в банке. Для каждого банка может быть определено свое напряжение (1; 1,2; 1,5; 1,8; 2,5; 3,3 В), подаваемое извне, а также тип связей (однопроводные или двухпроводные), подобно тому, как это делается у ПЛИС фирмы Altera. Таким образом, ДЭС-1 является универсальным интерфейсным контроллером, обеспечивающим связь МДА с любыми внешними устройствами.

Рассмотрим теперь возможные параметры микросхемы ДЭС-32, реализованной по технологии 90 нм, которая к настоящему времени освоена на предприятиях электронной промышленности России. При использовании данной технологии на площади 1 мм^2 можно разместить примерно 120 млн транзисторов. Соответственно, объем ВА составит 480 тыс. транзисторов. Этого количества транзисторов достаточно для размещения 36 КБ перепрограммируемой памяти и 9 КБ динамической памяти. Энергопотребление ВА пропорционально частоте работы операционного устройства f_{\max} . Если эта частота равна 1 ГГц, то энергопотребление ВА составит 40 мкВт. При этом производительность ВА при вычислениях с плавающей запятой двойной точности составит

4 Мфлопс. При обработке изображений или других цифровых сигналов с помощью алгоритмов быстрого преобразования Фурье производительность ВА составит 24 млн оп./с.

Интерфейсный автомат по структуре аналогичен ВА, но без энергонезависимой памяти. В то же время оперативная память увеличена до 72 КБ.

Для ДЭС-32 объем энергонезависимой/оперативной памяти составит 9/2,25 ГБ. При тактовой частоте 1 ГГц производительность ДЭС-32 составит 1–6 трлн оп./с в зависимости от классов решаемых задач. В случае полной загрузки всех ВА энергопотребление такой ДЭС-32 составит 10 Вт.

Следует сказать, что тактовая частота каждого ФА микросхемы ДЭС-32 может изменяться в широком диапазоне от 1 ГГц до десятков кГц даже непосредственно в процессе работы. Соответственно, будет изменяться производительность и энергопотребление. Микросхема ДЭС-32 может автоматически поддерживать энергопотребление не выше заданного уровня.

Микросхема ДЭС-32 может быть размещена в корпусе размером $40 \times 40 \text{ мм}$ с 320 планарными выводами, 64 из которых используются для подачи питания и земли. Из одной и той же полупроводниковой пластины можно получать также микросхемы ДЭС-16, ДЭС-8 и ДЭС-4. Последняя микросхема при размерах корпуса $5 \times 5 \text{ мм}$ может обеспечить реальную производительность 100 млрд оп./с при энергопотреблении всего 160 мВт.

Динамическую электронную структуру можно рассматривать как пример «вечной» микросхемы, которую можно вывести из строя только с помощью механического воздействия. Действительно, большая часть неисправностей будет приходиться на ячейки памяти, которые занимают 98 % объема ДЭС. Однако каждый ВА непрерывно контролирует состояние своей памяти и в случае возникновения неисправности исключает соответствующий блок памяти из списка доступных. Тем самым немного уменьшаются объем памяти ВА, что практически никак не сказывается на его функционировании. Выход из строя ВА уменьшает производительность ФА, в состав которого он входит, всего на 0,25 %. Если, однако, число отказавших ВА окажется достаточно большим, так что снижение производительности ФА станет заметным, автоматически увеличится тактовая частота, и производительность ФА восстановится до исходного значения. При этом энергопотребление ФА сохранится на прежнем уровне, так как отказавшие ВА энергии не потребляют. Аналогичная ситуация возникает и на уровне микросхемы. Если число отказавших ФА составляет заметную величину, каждый из исправных ФА повышает свою тактовую частоту, чтобы восстановить производительность

микросхемы до исходного значения. Итак, несмотря на полное отсутствие резервирования микросхема ДЭС при наличии множественных отказов элементов, число которых может составлять десятки тысяч, не только сохраняет работоспособность, но и поддерживает номинальное значение производительности. Это свойство позволяет использовать ДЭС в условиях сильного радиационного или космического излучения, где обычная электроника мгновенно выходит из строя. МДА, выполненные на базе ДЭС, независимо от размеров могут работать сколь угодно долгое время с номинальными параметрами без какого-либо ремонта. Конструкцию такой МДА можно делать неразборной.

Возможность регулировки теплового режима микросхемы в сочетании с рассмотренным в предыдущем разделе методом соединения элементов МДА позволяет получать многослойные трехмерные БИС в целях создания компактных сверхнадежных максимально защищенных баз данных в сочетании с мощной поисковой системой. Например, уложив друг на друга 64 кристалла ДЭС-64 и соединив по вертикали их выводы, получим структуру с размерами 80×80×40 мм (256 тыс. ФА или 65 млн ВА) и емкостью энергонезависимой памяти более 2 ТБ (10^{12} Б). При тактовой частоте 2 МГц и энергопотреблении не более 5 Вт данная структура может выполнять до 16 трлн операций сравнения символов в секунду. Пропускная способность каналов ввода-вывода такого устройства составит 32 МБ/с в каждом направлении.

Итак, реализация МДА исключительно на отечественной элементной базе вполне возможна в относительно короткие сроки и при относительно небольших финансовых затратах. Однако до начала разработки микросхем типа ДЭС необходимо проверить все аппаратные и программные решения на образцах МДА, выполненных на ПЛИС фирмы Altera, и экспериментально доказать все рассмотренные выше преимущества МДА. На этих же образцах можно осуществить функциональное моделирование основных узлов ДЭС.

Машины с динамической архитектурой в автоматических и автоматизированных системах управления

Применение МДА в автоматических и автоматизированных системах управления позволяет получить такие характеристики, которые принципиально недостижимы при использовании микропроцессоров с традиционной архитектурой.

Пожалуй, главным достоинством систем, использующих МДА, являются исключительно высокая надежность и живучесть. Даже простейшие автоматические системы, например управ-

ляющие самонаведением ракет или торпед, при использовании МДА будут состоять из большого числа одинаковых простых автоматов, каждый из которых выполняет лишь малую часть общей задачи. При выходе какого-либо автомата из строя та часть задачи, которую он выполнял, автоматически перейдет в другой исправный автомат. Даже одновременный выход из строя нескольких автоматов не приводит к отказу системы. Это свойство особенно ценно для систем, работающих в небезопасных системах в условиях космических или радиационных излучений. Для обычного микропроцессора любое повреждение фатально. Обычное резервирование ситуации качественно не изменяет. Поэтому вблизи радиационных источников электроника быстро выходит из строя. При использовании же МДА время жизни систем в условиях радиационных излучений возрастает многократно. Необходимо отметить, что таким свойством обладают лишь ДАС, в отличие от стационарных и перестраиваемых автоматных сетей, в которых выполняемые задачи жестко привязаны к конкретным автоматам.

Не менее важным свойством МДА является исключительно высокая информационная безопасность, в принципе недостижимая для традиционных архитектур. Для любых вычислительных систем существуют две основные угрозы безопасности: неумышленные ошибки системных и прикладных программистов и умышленное создание программ с вредоносными свойствами (программист-диверсант). Реальные методы борьбы с этими угрозами в системах традиционного типа отсутствуют. Автоматические методы тестирования программ позволяют выявить лишь типовые грубые ошибки, а обнаружить вредоносную программу, созданную квалифицированным программистом, крайне затруднительно. Низкая информационная безопасность современных компьютеров обусловлена тем, что программы, представленные на машинном языке, имеют непосредственный, практически неконтролируемый доступ к физическим ресурсам (оперативной или дисковой памяти). В МДА и программы, и данные независимо от их размещения представлены в форме информационных пакетов — программных элементов (ПЭ). Любой ПЭ включает в свой состав служебную информацию, определяющую тип ПЭ (данные, операторы, ссылки и т. д.) и указатели на те ПЭ, с которыми данный ПЭ связан и которые (и только они) могут иметь доступ к ПЭ по определенному протоколу, включающему в ряде случаев динамическую систему паролей. Поэтому никакая программа в МДА не может иметь несанкционированный доступ к любой другой программе, поскольку контроль доступа осуществляется на аппаратном уровне, что и обеспечивает практически абсолютную

информационную безопасность даже в случае системного программиста-диверсанта. Необходимо отметить, что если архитектура современных микропроцессоров и операционных систем общеизвестна, то архитектура МДА известна лишь узкому кругу разработчиков. Поэтому никакие хакеры или компьютерные вирусы не смогут нанести ущерб МДА хотя бы в силу отсутствия информации об архитектуре.

Применение МДА позволяет вообще отказаться от использования импортных микросхем. На уже существующих в России технологиях (например, 90 нм или даже 130 нм) можно создать микросхему ДЭС, которая по таким характеристикам, как производительность и энергоэффективность, намного превзойдет не только современные зарубежные микропроцессоры, выполненные по технологии 22–28 нм, но и те, технологии для которых еще только разрабатываются, а их производство планируется не ранее 2020 г. Поскольку ДЭС будет включать в свой состав оперативную и энергонезависимую память, распределенную по автоматам, номенклатура комплектующих изделий для МДА любой производительности может состоять лишь из одной микросхемы отечественного производства.

Основным фактором, ограничивающим возможности современных автоматических и автоматизированных систем управления, является производительность существующих микропроцессоров. Наиболее мощным российским микропроцессором является четырехъядерный МЦСТ-Р1000, выполненный по технологии 90 нм, с частотой 1 ГГц, пиковой производительностью 8 Гфлопс и энергопотреблением 20 Вт. Однако реальная производительность микропроцессора может приближаться к указанному значению лишь при вычислении скалярного произведения векторов, когда в одном такте могут выполняться две операции — умножения и сложения. В остальных случаях производительность снижается по меньшей мере в 2 раза даже в случае оптимального программирования при распараллеливании задачи на четыре ядра. При невысокой квалификации программистов реальная производительность может снизиться еще в десятки раз. Разделить задачу на несколько микропроцессоров далеко не всегда представляется возможным, тем более что каналы сетевого обмена между микропроцессорами Р1000 достаточно медленные (не более 10 МБ/с). В то же время имеется ряд задач (обработка радиолокационных или гидроакустических сигналов, обработка изображений, ситуационное моделирование), для эффективного решения которых требуется производительность, измеряемая сотнями и тысячами миллиардов операций в секунду. В итоге разработчикам автоматизированных си-

стем управления приходится либо существенно ограничивать характеристики решаемых задач, либо пытаться решить задачу на большом числе процессоров, что далеко не всегда представляется возможным, даже не принимая во внимание трудности программирования. При использовании МДА проблема производительности даже не встает. Любая требуемая производительность легко достигается включением в состав системы достаточного числа автоматов. При этом ни рабочие частоты, ни уровень интеграции особой роли не играют. Вопросы распараллеливания в этом случае решаются автоматически, без какого-либо участия программистов. В МДА отсутствуют такие операции, как условные и безусловные переходы, обращение к памяти, обработка прерываний, вызов процедур, занимающие в традиционных микропроцессорах значительную часть времени. Эффективность программ с точки зрения производительности практически не зависит от программиста. Итак, применение МДА, в отличие от традиционных микропроцессоров, позволяет решать в полном объеме практически любые задачи автоматизированной системе управления.

Машина с динамической архитектурой позволяет создавать вычислительные устройства, отличающиеся существенно большей производительностью и меньшим энергопотреблением по сравнению с традиционными микропроцессорами. В случае непосредственной реализации МДА в виде специально разработанной микросхемы ДЭС-32 можно получить производительность порядка 6 трлн оп./с при энергопотреблении не более 10 Вт. При этом энергопотребление микросхемы пропорционально реальной производительности. Если для конкретной задачи требуется производительность 6 млрд оп./с, то энергопотребление составит лишь 10 мВт. В результате можно создавать бортовые системы с производительностью, не достижимой для современных наземных систем при энергопотреблении, измеряемом единицами ватт.

Характерной особенностью МДА, выполненных на базе современных ПЛИС фирмы Altera, является возможность непосредственно подключать их к любым цифровым внешним устройствам и цифровым каналам со скоростями передачи до 28 Гбит/с. В частности, можно без промежуточных интерфейсных схем подключаться к современным микропроцессорам по шинам PCI или PCIe, к дисковой памяти по шине SATA и к другим современным интерфейсам, включая LVDS-каналы. Лишь для подключения к каналу USB требуется соответствующий микроконтроллер. Поэтому вычислительные устройства на базе МДА отличаются минимальной номенклатурой применяемых микросхем. Кроме ПЛИС, в со-

став МДА обязательно входят микросхемы оперативной и энергонезависимой памяти, а также конвертеры напряжения, обеспечивающие питание ПЛИС. Основная часть выводов ПЛИС используется для соединения между собой ПЛИС, которые образуют автоматную сеть, а также для подключения к микросхемам памяти. Часть выводов у некоторых ПЛИС может использоваться для подключения к различным интерфейсам. Указанная особенность МДА позволяет полностью унифицировать любые автоматические и автоматизированные системы управления на структурном, конструктивном и программном уровнях, а также по номенклатуре комплектации.

В целом применение МДА позволяет создавать автоматические и автоматизированные системы управления, качественно превосходящие мировой уровень.

Помимо вышеописанных задач создания автоматизированных систем управления, а также некоторого множества характерных для суперкомпьютеров задач, перечисленных в статье [10], МДА могут быть использованы и для решения более сложных в структурном смысле задач. Наиболее интересной является возможность использования МДА в робототехнических системах, поскольку в них сочетается множество задач искусственного интеллекта (распознавание образов, анализ сцен, принятие решений, обучение и др.) с задачами автоматического управления механическими и прочими системами робота. В то же время, поскольку МДА является весьма компактным устройством при высокой производительности, вполне возможно размещение такой

системы в корпусе любого робота. Следует также отметить, что для решения задач искусственного интеллекта возможно создание на основе ДАС нейронных сетей.

Заключение

Предложенные в статье методы реализации СКДА, основанных на теории ДАС, с использованием как существующих микросхем ПЛИС, так и специально разрабатываемых отечественных БИС, являются полностью оригинальными и не имеют аналогов в мире. Других работ в области теории и применения ДАС, а также разработки МДА/СКДА в последние четверть века никем не предлагалось.

Главным практическим результатом работы является возможность создания отечественной элементной базы для реализации СКДА, характеристики которых существенно превосходят характеристики существующих суперкомпьютеров по габаритам, стоимости и энергопотреблению при сопоставимой производительности. При этом обеспечивается неограниченная масштабируемость вычислительной системы, а также крайне высокая надежность и информационная безопасность.

Работа поддержана Программой фундаментальных научных исследований отделения нанотехнологий и информационных технологий АН «Архитектурно-программные решения и обеспечение безопасности суперкомпьютерных информационно-вычислительных комплексов новых поколений».

Литература

1. Митропольский Ю. И. Новые концепции построения вычислительных суперсистем // Тр. Физико-технологического института РАН. 2016. Т. 25. С. 22–37.
2. J. von Neuman. Theory of Self-reproducing Automata. — Urbana and London: University of Illinois Press, 1966. — 403 p.
3. Каляев А. В. Многопроцессорные системы с программируемой архитектурой. — М.: Радио и связь, 1984. — 240 с.
4. Каляев И. А., Левин И. И. Многопроцессорные вычислительные структуры с динамически реконфигурируемой архитектурой на основе ПЛИС // Сб. науч. тр. ИТМиВТ. 2008. № 1. С. 44–45.
5. 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.
6. Торгашев В. А. Динамические автоматные сети // Тр. СПИИРАН. 2013. Вып. 4(27). С. 23–34.
7. Торгашев В. А., Царев И. В. Средства организации параллельных вычислений и программирования в мультипроцессорах с динамической архитектурой // Программирование. 2001. № 4. С. 53–68.
8. Торгашев В. А., Царев И. В. Семейство суперкомпьютеров с динамической архитектурой — концептуальные основы // Искусственный интеллект. 2009. № 3. С. 251–257.
9. Торгашев В. А., Царев И. В. Динамические автоматные сети как модель параллельных вычислений в мультипроцессорах с динамической архитектурой // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2009. № 3. С. 11–20.
10. Торгашев В. А., Царев И. В. Технологии решения сложных задач на основе динамических автоматных сетей // Информационно-управляющие системы. 2015. № 6. С. 57–65. doi:10.15217/issn1684-8853.2015.6.57

UDC 681.3.01:681.3.02:681.325.6

doi:10.15217/issn1684-8853.2016.6.74

Modern Circuitry Implementation of Dynamic Architecture SupercomputersTorgashev V. A.^a, Dr. Sc., Tech, Professor, tor@spiiras.nw.ruTsarev 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

Introduction: Modern supercomputers have a number of shortcomings concerning their technical and economic characteristics. Besides, the performance of supercomputers when solving real problems is significantly lower than their theoretical performance. **Purpose:** We develop ways to build supercomputers based on dynamic automata networks, including special circuitry solutions which allow you to considerably improve the specific characteristics of the supercomputers. **Results:** We have formulated the fundamental principles of creating dynamic architecture supercomputers based on dynamic automata networks, including the implementation of dynamic automata with programmable logic chips and custom domestic LSI chips, providing very high structure regularity for the chips and modules of the system. This considerably simplifies creating supercomputers with dynamic architecture as compared to the conventional supercomputers, and can significantly improve them in terms of their size, energy consumption and cost. **Practical relevance:** The obtained results allow you to considerably reduce the time and cost of developing computational systems with unlimitedly high performance, providing unlimited scalability, extremely high reliability and informational security of such systems.

Keywords — Dynamic Automata Networks, Dynamic Architecture Supercomputers, Supercomputer Circuitry.

References

1. Mitropolsky Y. I. New Concepts for Construction of Computing Supersystems. *Trudy Fiziko-tekhnologicheskogo instituta RAN*, 2016, vol. 25, pp. 22–37 (In Russian).
2. J. von Neuman. *Theory of Self-reproducing Automata*. Urbana and London, University of Illinois Press, 1966. 403 p.
3. Kalyayev A. V. *Mnogoprotsessornye sistemy s programmami arkhitekturoi* [Multiprocessor Systems with Programmable Architecture]. Moscow, Radio i sviaz' Publ., 1984. 240 p. (In Russian).
4. Kalyayev I. A., Levin I. I. Multiprocessor Computing Structures with Dynamically Reconfigurable Architecture on the Base of FPGA. *Sbornik nauchnykh trudov ITMiVT*, 2008, no. 1, pp. 44–45 (In Russian).
5. Torgashev V. A. Automata Networks: History of Development and Contemporary State. In: *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).
6. Torgashev V. A. Dynamic Automata Networks. *Trudy SPIIRAN*, 2013, vol. 4(27), pp. 23–34 (In Russian).
7. Torgashev V. A., Tsarev I. V. Means for Organization of Parallel Computations and Programming in Multiprocessors with Dynamic Architecture. *Programmirovaniye*, 2001, no. 4, pp. 53–68 (In Russian).
8. Torgashev V. A., Tsarev I. V. A Family of Supercomputers with Dynamic Architecture — Conceptual Basis. *Iskusstvennyi intellekt*, 2009, no. 3, pp. 251–257 (In Russian).
9. Torgashev V. A., Tsarev I. V. Dynamic Automata Networks as a Model of Parallel Computations in the Multiprocessors with Dynamic Architecture. *Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh technologii* [Herald of Computer and Information Technologies], 2009, no. 3, pp. 11–20 (In Russian).
10. Torgashev V. A., Tsarev I. V. Technologies of Solving Complicated Problems on the Base of Dynamic Automata Networks. *Informatsionnoupavliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2015, no. 6, pp. 57–65 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2015.6.57

МЕТОД ВЫБОРА СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ С УЧЕТОМ КРИТЕРИЯ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ ПРЕДПРИЯТИЯ

Е. В. Попова^а, старший преподаватель

^аСмольный институт Российской академии образования, Санкт-Петербург, РФ

Постановка проблемы: при наличии нескольких вариантов системы защиты информации для данного предприятия необходимо выбрать многокритериальный оптимизационный вариант, который опирается на количественное значение конкурентоспособности предприятия. Методики такого выбора отсутствуют. **Цель исследования:** определение метода выбора наилучшего варианта системы защиты информации для повышения защищенности от угроз нарушения информационной безопасности предприятия. **Результаты:** описан модифицированный метод рандомизированных сводных показателей, позволяющий решить многокритериальную оптимизационную задачу. В качестве критерия выбора системы защиты информации предлагается количественное значение конкурентоспособности предприятия. Предложен метод прогнозирования снижения ущерба от нарушения информационной безопасности после внедрения системы защиты информации. **Практическая значимость:** предложенная модель повышения информационной безопасности с учетом критерия обеспечения конкурентоспособности предприятия позволяет повысить состояние защищенности от угроз нарушения информационной безопасности предприятия.

Ключевые слова — система защиты информации, конкурентоспособность предприятия, информационная безопасность.

Введение

Проблемы информационной безопасности (ИБ) актуализируются на предприятиях с ростом информационных ресурсов, баз данных, с применением информационных технологий. При планировании деятельности по повышению защищенности от угроз нарушения ИБ перед предприятиями стоит выбор разработки или использования готовых средств защиты информации. Разработка и создание средств защиты информации требуют значительных финансовых вложений и получения лицензий Минобороны России, ФСБ России, Федеральной службы по техническому и экспертному контролю (ФСТЭК) России [1]. Готовые средства защиты представлены на рынке в разных ценовых категориях. При создании системы защиты информации (СЗИ) мы будем ориентироваться на предприятия, использующие готовые средства защиты, стоимость которых ограничена допустимыми затратами на данном предприятии.

Основные задачи построения СЗИ

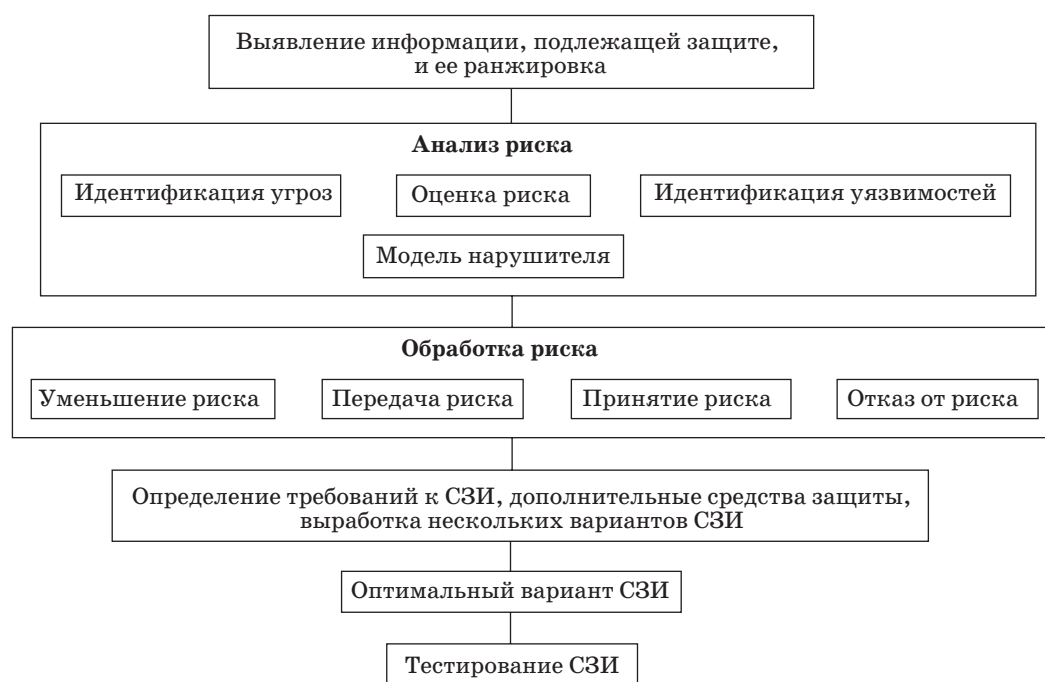
Согласно ГОСТ РФ 50922-2006: «система защиты информации: Совокупность органов и (или) исполнителей, используемой ими техники защиты информации, а также объектов защиты информации, организованная и функционирующая по правилам и нормам, установленным соответствующими документами в области защиты информации» [2]. «При принятии решения о необходимости защиты информации, содержащейся в информационной системе, осуществля-

ется: <...> принятие решения о необходимости создания системы защиты информации информационной системы, а также определение целей и задач защиты информации в информационной системе...» [3].

Построение СЗИ — это комплексный поэтапный процесс, начинающийся с определения цели СЗИ. Целью является повышение ИБ, оцениваемой по критерию обеспечения конкурентоспособности предприятия.

В приказе ФСТЭК говорится, что «для обеспечения защиты информации, содержащейся в информационной системе, оператором назначается структурное подразделение или должностное лицо (работник), ответственные за защиту информации» [3]. На предприятии формируется самостоятельное подразделение, которое занимается проблемами информационной безопасности — служба информационной безопасности (СИБ). Прописывается политика ИБ, согласованная с бизнес-процессами предприятия.

«Организационные и технические меры защиты информации реализуются в рамках системы защиты информации информационной системы в зависимости от информации, содержащейся в информационной системе» [3]. Сначала информация делится на общедоступную и ограниченного доступа. В информации ограниченного доступа выделяют информацию, составляющую государственную тайну и конфиденциальную. Если предприятие негосударственное, выбранную информацию можно ранжировать по стоимости информационного ресурса. Определив, что нужно защищать, переходят к анализу рисков.



■ Рис. 1. Схема построения СЗИ

Проводится идентификация угроз и уязвимостей имеющихся активов.

«Классификация угроз осуществляется по следующим признакам: по виду защищаемой информации; по видам возможных источников угроз безопасности; по типу информационной системы (ИС), на которую направлены угрозы; по способу реализации угроз безопасности; по виду несанкционированных действий; по используемой уязвимости; по объекту воздействия» [4]. Реализация угроз возможна при наличии уязвимостей. В список уязвимостей для предприятия включают: уязвимости программного обеспечения (ПО), уязвимости системного ПО, уязвимости прикладного ПО. Можно пользоваться единой базой данных Common Vulnerabilities and Exposures.

Затем строится модель нарушителя — описание потенциальных нарушителей правил разграничения доступа. Следующий этап — обработка риска, т. е. уменьшение риска, передача риска, принятие риска или отказ от риска.

Следующим этапом является формулирование требований к проектируемой системе. «Формирование требований к защите информации, содержащейся в информационной системе, осуществляется обладателем информации (заказчиком)» [3]. Выбирают дополнительные средства защиты, исходя из выявленных угроз, уязвимостей, задач предприятия и финансовых возможностей. Из нескольких вариантов СЗИ выбирается оптимальный по установленным критериям. Последним этапом проводится тестирование СЗИ. Этапы построения СЗИ представлены на рис. 1.

Служба ИБ проводит регистрацию событий и инцидент-менеджмент; контроль целостности, антивирусного ПО, политик, управления уязвимостями; анализ трафика. Необходимо выбирать наилучший вариант СЗИ для повышения состояния защищенности предприятия, используя критерий обеспечения конкурентоспособности предприятия.

Метод прогнозирования снижения ущерба от нарушения ИБ после внедрения СЗИ

Пусть $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_m)$ — вектор исходных характеристик исследуемой системы. Обозначим условный эффект при изменении информационной безопасности $\mathcal{E}_{\text{ИБ}}(\mathbf{x})$. Он равен разности ущербов до и после реализации СЗИ [5]:

$$\mathcal{E}_{\text{ИБ}}(\mathbf{x}) = Y_{\text{до}}(1 - \kappa_1(\mathbf{x})\kappa_2(\mathbf{x})) = Y_{\text{до}}(1 - \rho(\mathbf{x})),$$

$$\rho(\mathbf{x}), \kappa_1(\mathbf{x}), \kappa_2(\mathbf{x}) \in [0; 1], \quad (1)$$

где $Y_{\text{до}}$ — величина ущерба от нарушений ИБ до внедрения СЗИ; $\kappa_1(\mathbf{x}), \kappa_2(\mathbf{x})$ — коэффициенты снижения количества нарушений и уменьшения тяжести нарушений соответственно до и после внедрения СЗИ; $\rho(\mathbf{x})$ — коэффициент изменения конкурентоспособности. При величине ущерба в денежном выражении $Y_{\text{пос}}$ после внедрения СЗИ формулы (1) позволяют получить теоретические и реальные значения коэффициента изменения конкурентоспособности и условного эффекта (таблица).

Получив теоретическое значение коэффициента изменения конкурентоспособности, можно спрогнозировать снижение ущерба после внедре-

Теоретические значения	Реальные значения
$\rho(\mathbf{x})$ получен с помощью модифицированного метода рандомизированных сводных показателей (ММРСП)	$\rho(\mathbf{x}) = \kappa_1(\mathbf{x})\kappa_2(\mathbf{x})$
$\mathcal{E}_{\text{у ИБ}}(\mathbf{x}) = Y_{\text{до}}(1 - \rho(\mathbf{x}))$	$\mathcal{E}_{\text{у ИБ}}(\mathbf{x}) = Y_{\text{до}} - Y_{\text{пос}}$

ния оптимального варианта СЗИ. В целях увеличения условного эффекта нужно выбрать минимальное значение коэффициента изменения конкурентоспособности при обеспечении ИБ (коэффициента относительного уменьшения ущерба). Для этого необходимо решить следующую оптимизационную задачу:

$$\rho(\mathbf{x}^0) = \min(\rho(\mathbf{x})), \rho \in [0; 1],$$

$$\mathbf{x}^0 \in X^d \text{ при ограничении } Z(\rho) \leq Z^d, \quad (2)$$

где \mathbf{x}^0 — оптимальное значение вектора; X^d — множество допустимых значений векторов числовых характеристик; Z^d — допустимые затраты для предприятия. Средства защиты информации выбираются из ценовой категории, которая позволяет ограничиться допустимыми затратами.

Необходимо выбрать наилучший вариант СЗИ, приводящий к повышению состояния защищенности от угроз нарушения информационной безопасности, характеристики которого обеспечивают минимум коэффициента изменения конкурентоспособности, учитывая допустимые затраты. Для решения этой задачи мы применим ММРСП.

При решении задач с несколькими критериями оптимальности ММРСП позволяет построить сводную оценку, которая объединяет значимость характеристик, и упорядочить объекты по предпочтительности [6, 7].

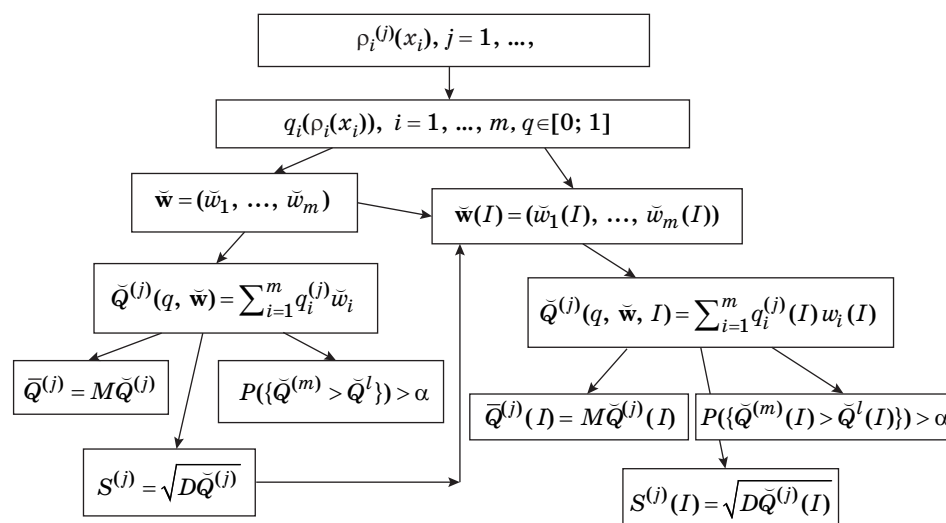
Модифицированный метод рандомизированных сводных показателей основан на экспертных оценках коэффициента изменения конкурентоспособности $\rho(\mathbf{x})$ по шкале каждого из критериев [5]. Мы оцениваем k вариантов СЗИ по m критериям. После нормировки $q_i(\rho_i(x_i))$ исходной матрицы рандомизированный вектор весовых коэффициентов $\tilde{\mathbf{w}}$ формирует сводный показатель и его стохастические оценки. На рис. 2 представлена схема ММРСП.

Дополнительная неполная, неточная и нечисловая информация I повышает точность вычислений. По многокритериальному сводному показателю мы получаем оптимизационный многокритериальный вариант СЗИ для данного предприятия и обеспечение ИБ предприятия. Экспертные оценки формируются специалистами, которые соответствуют определенным требованиям.

«Эксперт (от лат. expertus — опытный, знающий, сведущий) — специалист, дающий заключение при рассмотрении какого-нибудь вопроса» [8]. Эксперты должны быть компетентными, опытными, эрудированными в смежных областях, объективными, иметь ученую степень. Эксперты должны пройти инструктаж, определить степень согласованности действий. Эксперты получают шкалу измерений, объект измерений, узнают, какое значение показателей является наилучшим. Коэффициент ранговой согласованности Кендалла — Смита определяется формулой

$$W = \frac{12S}{n^2(m^3 - m)}, \quad (3)$$

где S — сумма квадратов отклонений суммы рангов каждого объекта экспертизы от среднего арифметического рангов; n — число экспертов; m — число оцениваемых объектов. W стремится к 0 при несогласованности и к 1 при обратной



■ Рис. 2. Общая схема ММРСП

ситуации. Выводы экспертов должны быть инвариантны относительно допустимых преобразований шкал измерений.

Используется метод индивидуальной оценки. Объект оценки получает определенное значение по оценочной шкале, а затем эти индивидуальные значения разных экспертов усредняются по Колмогорову [9].

Модель повышения ИБ по критерию обеспечения конкурентоспособности предприятия и расчет эффективности СЗИ

В работе [10] была выведена формула количественного подсчета конкурентоспособности предприятия при обеспечении информационной безопасности:

$$K_{\text{пред}} = \sum_{i=1}^n a_i b_i \frac{\alpha_i F_i + \mathcal{E}_{\text{у ИБ}}^i}{\alpha_i^b F_i^b} \frac{C_i^b + E_i^b}{C_i + E_i + Z_i}, \quad (4)$$

где a_i — доля товара в объеме продаж за анализируемый период, доли единицы; $\sum_{i=1}^n a_i = 1$; b_i — относительный вес рынка, на котором представлен товар предприятия; $\alpha_i F_i$ — коммерческая оценка качества; C_i — покупная цена продукции; E_i — сопутствующие затраты на использование; индекс «б» означает те же показатели, но по отношению к базовым товарам и услугам.

Модель повышения ИБ по критерию обеспечения конкурентоспособности предприятия отражают следующие соотношения: оптимизационная задача (2) и формула подсчета конкурентоспособности (4). Схема реализации модели представлена на рис. 3.



■ Рис. 3. Схема реализации модели повышения ИБ предприятия

В соответствии с приказом ФСТЭК России от 18 февраля 2013 г. № 21, «оценка эффективности реализованных в рамках системы защиты персональных данных мер по обеспечению безопасности персональных данных проводится организацией самостоятельно или с привлечением юридических лиц, имеющих соответствующую лицензию» [11]. При этом форма оценки эффективности, а также содержание и форма итоговых документов в данном приказе не установлены. В ГОСТ [2] под эффективностью СЗИ понимается степень соответствия результатов защиты информации поставленной цели. Целью является повышение ИБ, оцениваемой по критерию обеспечения конкурентоспособности предприятия. Выбирая наилучший вариант СЗИ по оптимальному значению коэффициента изменения конкурентоспособности, мы повышаем состояние защищенности предприятия от угроз нарушения ИБ с учетом критерия обеспечения конкурентоспособности предприятия. Следовательно, выбранный оптимизационный вариант СЗИ является эффективным.

Подсчет экономической эффективности важен для предпроектных расчетов и обоснования выделяемых затрат [12]. В этом случае эффективность СЗИ зависит от результатов и затрат, сбалансированных в приемлемой пропорции. При этом затраты не должны превышать Z^d [13]. Основным результатом при создании СЗИ является уменьшение ущерба в денежном выражении при реализации угроз ИБ. Поэтому за результаты реализации конкретной СЗИ следует принять максимальное значение $\mathcal{E}_{\text{у ИБ}}$ условного эффекта при усилении ИБ. Тогда экономическая эффективность СЗИ

$$E_{\text{СЗИ}} = \frac{Y_{\text{до}}(1 - \rho(\mathbf{x}))}{Z} - 1, \quad (5)$$

где Z — затраты на создание СЗИ. Если итоговая разность больше нуля, то данная реализация СЗИ считается эффективной относительно отдачи от вложенных средств.

Заключение

Современные тенденции к увеличению общего количества кибер-атак, числа компаний, подвергающихся нападениям, и величины ущерба заставляют больше внимания уделять ИБ. Сопровождающие инциденты простои в работе, снижение производительности, потеря имиджа, репутационные проблемы приводят к убыткам не только в текущем периоде, но и влияют на деятельность предприятия в будущем. Выбор наилучшего варианта СЗИ с учетом критерия конкурентоспособности предприятия позволяет повысить состояние защищенности предприятия от угроз нарушения ИБ.

Литература

1. Официальный сайт Федеральной службы по техническому и экспертному контролю. <http://www.fstec.ru> (дата обращения: 18.02.2016).
2. ГОСТ Р 50922-2006. Защита информации. Основные термины и определения. <http://docs.cntd.ru/document/gost-r-50922-2006> (дата обращения: 18.04.2016).
3. Федеральная служба по техническому и экспертному контролю. Приказ от 11 февраля 2013 г. № 17 об утверждении требований о защите информации, не составляющей государственную тайну, содержащейся в государственных информационных системах. <http://fstec.ru/normotvorcheskaya/akty/53-prikazy/702-prikaz-fstek-rossii-ot-11-fevralya-2013-g-n-17> (дата обращения: 18.06.2016).
4. Федеральная служба по техническому и экспертному контролю. 15 февраля 2008 г. Базовая модель угроз безопасности персональных данных при их обработке в информационных системах персональных данных. <http://fstec.ru/component/attachments/download/289> (дата обращения: 18.06.2016).
5. Попова Е. В. Выбор варианта системы защиты информации по критерию обеспечения конкурентоспособности предприятия // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2014. № 2(90). С. 155–160.
6. Хованов Н. В., Федотов Ю. В. Модели учета неопределенности при построении систем// Научные доклады НИИ менеджмента СПбГУ. 2006. № 28. С. 1–37.
7. Hovanov N., Yudaeva M., Hovanov K. Multicriteria Estimation of Probabilities on Basis of Expert Non-numeric, Non-exact and Non-complete knowledge// Abstracts of 18th Intern. Conf. on Multiple Criteria Decision Making, Chania (Greece), June 19–23, 2006. P. 102.
8. Общий толковый словарь русского языка. <http://tolkslovar.ru/ie672.html> (дата обращения: 18.07.2016).
9. Колмогоров А. Н. Математика и механика // Избранные труды / отв. ред. С. М. Никольский, сост. В. М. Тихомиров. — М.: Наука, 1985. Т. 1. С. 136–138.
10. Попова Е. В. Расчет конкурентоспособности малых предприятий сферы сервиса при усилении информационной безопасности // Вестник Российской академии естественных наук. 2012. № 16(3). С. 48–51.
11. Федеральная служба по техническому и экспертному контролю. Приказ ФСТЭК России от 18 февраля 2013 г. № 21 (дата обращения: 18.02.2016). www.fstec.ru.
12. Маслова Н. А. Методы оценки эффективности систем защиты информационных систем // Штучный интеллект. 2008. № 4. С. 253–264.
13. Попова Е. В. Эффективность системы защиты информации, выбранной по критерию обеспечения информации// Приборостроение. 2014. № 9. С. 19–22.

UDC 006.72

doi:10.15217/issn1684-8853.2016.6.85

Choosing an Information Protection System Taking into Account the Company Competitiveness

Popova E. V.^a, Senior Lecturer, serana5@inbox.ru^aSmol'nyi Institut RAO, 59, Poliustrovskii Pr., 195197, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: When an information protection system for a given company can be implemented in several ways, you have to choose a multi-criteria optimization variant based on a quantitative value of the company competitiveness. Techniques for such choice are not available. **Purpose:** The aim of this work is to find a method for choosing the best way of implementing an information protection system in order to improve the information security. **Results:** A modified method of randomized aggregates is proposed, which allows you to solve a multi-criteria optimization problem. As a criterion for choosing an information protection system, a quantitative value of the company competitiveness is offered. A method is proposed for predicting how the information security violation impact can be reduced after the information protection system is introduced. **Practical relevance:** The proposed model of improving the information security taking into account the company competitiveness criterion allows you to more efficiently protect a company from threats to its information security.

Keywords — Information Protection System, Company Competitiveness, Information Security.

References

1. *Ofitsial'nyi sait Federal'noi sluzhby po tekhnicheskomu i ekspertnomu kontroliu* [The Official Site of the Federal Service for Technical and Expert Control]. Available at: www.fstec.ru (accessed 18 February 2016).
2. State Standard 0922-2006. Data Protection. Basic Terms and Definitions. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/gost-r-50922-2006> (accessed 18 April 2016).
3. *Federal'naia sluzhba po tekhnicheskomu i ekspertnomu kontroliu. Prikaz ot 11 fevralia 2013 g. N 17 ob utverzhenii trebovaniĭ o zashchite informatsii, ne sostavliaiushchei gosudarstvennuiu tainu, sodержashcheisia v gosudarstvennykh informatsionnykh sistemakh* [The Federal Service for Technical and Expert Control. Order of February 11, 2013 N 17 on the Approval of the Data Protection Requirements, not the State Secret Contained in the State Information Systems] Available at: <http://fstec.ru/normotvorcheskaya/akty/53-prikazy/702-prikaz-fstek-rossii-ot-11-fevralya-2013-g-n-17> (accessed 18 June 2016).
4. *Federal'naia sluzhba po tekhnicheskomu i ekspertnomu kontroliu. Bazovaia model' ugroz bezopasnosti personal'nykh dannykh pri ikh obrabotke v informatsionnykh sistemakh personal'nykh dannykh: vypiska 15 fevralia 2008 g.* [The Federal Service for Technical and Expert Control. The Basic Model of Personal Data Security Threats at their Processing within the Information Systems of Personal Data: Out February 15, 2008] Available at: <http://fstec.ru/component/attachments/download/289> (accessed 18 June 2016).
5. Popova E. V. Selecting Information Protection System by the Criterion of Ensuring the Competitiveness of Enterprises. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki*, 2014, no. 2(90), pp. 155–160 (In Russian).

6. Hovanov N. V., Fedotov Ju. V. The Models Account for the Uncertainty in the Construction of Systems. *Nauchnye doklady NII menedzhmenta* [Scientific Reports of Research Institute of Management]. SPbGU, 2006, no. 28, pp. 1–37 (In Russian).
7. Hovanov N., Yudaeva M., Hovanov K. Multicriteria Estimation of Probabilities on Basis of Expert Non-numeric, Non-exact and Non-complete Knowledge. *Abstracts of 18th Intern. Conf. on Multiple Criteria Decision Making*, Chania (Greece), June 19–23, 2006, p. 102.
8. *Ozhegov Tolkovyy Slovar'* [Official Web Site of General Dictionary of Russian Language]. Available at: <http://tolkslovar.ru/ie672.html> (accessed 18 July 2016).
9. Kolmogorov A. N. Mathematics and Mechanics. *Izbrannyye trudy*, otv. red. S. M. Nikol'skiy, sost. V. M. Tihomirov, Moscow, Nauka Publ., 1985, vol. 1, pp. 136–138 (In Russian).
10. Popova E. V. Calculation of the Competitiveness of Small Enterprises of Sphere of Service at Strengthening Information Security. *Vestnik Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk*, 2012, no. 16(3), pp. 48–51 (In Russian).
11. *Prikaz FSTJeK Rossii ot 18 Fevralja 2013 g. № 21*. [Official'nyj Sajt Federal'noj Sluzhby po Tehnicheskomu i Jekspertnomu Kontrolju]. Available at: <http://www.fstec.ru> (accessed 18 February 2016).
12. Maslova N.A. Methods for Evaluating the Effectiveness of the Protection of Information Systems Systems. *Shtuchnii intelekt*, 2008, no. 4, pp. 253–264 (In Russian).
13. Popova E. V. The Effectiveness of the Protection of Information Systems, Selected by the Criterion of Providing Information. *PriBORostroenie*, 2014, no. 9, pp. 19–22 (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 2002–2015 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).

ОРГАНИЗАЦИЯ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБМЕНА НАВИГАЦИОННЫХ ПОСТОВ И ОБЪЕКТА НАВИГАЦИИ В АКТИВНО-ПАССИВНОЙ СИСТЕМЕ

Г. Н. Ульянов^а, доктор техн. наук, профессор

Н. Г. Черенок^а, канд. техн. наук, доцент

И. О. Игнатьев^а, преподаватель

^аМихайловская военная артиллерийская академия, Санкт-Петербург, РФ

Постановка проблемы: широкое применение беспилотных летательных аппаратов, выполняющих задачи на ограниченном пространстве, требует специальных каналов передачи данных, которые будут функционировать в условиях воздействия преднамеренных помех. **Цель:** разработка помехоустойчивых методов формирования и передачи сообщений для таких каналов связи. **Результаты:** предложены методы, изменяющие классическую систему кодирования и обработки дискретного сообщения, которые позволяют передавать N -битный символ за один такт с декодированием передаваемого сообщения в базе Чебышёва. Для этого выбран носитель, отличный от гармонического, — это импульсы, описываемые классическими ортогональными полиномами Чебышёва первого рода. N -битный символ формируется путем простого суммирования импульсов Чебышёва с возрастающими номерами. Импульсы, кодирующие «1», имеют нулевую начальную фазу, импульсы, кодирующие «0», — противофазны. Принятый N -битный символ дискретизируется аналого-цифровым преобразователем с использованием тактовых импульсов, подчиняющихся закону косинуса, и обрабатывается стандартной программой быстрого преобразования Фурье. На выходе схемы обработки получаем параллельный код из положительных и отрицательных импульсов, соответствующий переданному сообщению. Оценка вероятности битовой ошибки для отношения сигнал/шум, равного -1 дБ, при передаче 64-битного символа соответствует ошибке современных систем передачи данных при отношении сигнал/шум более $+6$ дБ. **Практическая значимость:** предлагаемые методы кодирования и обработки, кроме выигрыша в помехоустойчивости, позволяют увеличить скорость обмена данными, а также избавиться от межсимвольной интерференции, причина которой здесь просто исключена, что дает возможность в той же полосе частот традиционного гармонического базиса передавать больший объем информации.

Ключевые слова — несинусоидальный полиномиальный переносчик, передача одним импульсом, обработка в базе Чебышёва.

Введение

Локальные навигационные системы (ЛНС) активно-пассивного типа в своем составе имеют четыре навигационных поста, располагающихся на беспилотном летательном аппарате (БПЛА). Каждый из них имеет передающую и антенную системы. Высокочастотный сигнал должен на борту объекта навигации обеспечить получение:

- времени прихода сигнала от навигационного поста со своим идентификационным признаком;
- сокращенных координат (пятизначных) этого же навигационного поста.

Указанные данные являются исходными для реализации алгоритма определения координат объекта навигации на борту БПЛА.

Целью работы является разработка новых методов формирования и обработки сообщений для ЛНС, базирующейся на БПЛА.

Способ формирования сигнала на борту ЛНС

Учитывая динамику функционирования ЛНС (при обязательном учете помехового воздействия), следует в первую очередь позаботиться о выборе переносчика информации для рассматриваемой

системы. Традиционные переносчики, используемые в качестве модели гармонические функции, практически исчерпали свои возможности как по объему и скорости передачи, так и по помехозащищенности. Увеличивая объем и скорость передачи, уменьшаем помехоустойчивость и наоборот.

В то же время сигналы с синусоидальными переносчиками являются весьма частным случаем более сложных сигналов, у которых переносчики вообще несинусоидальны. Модель таких колебаний имеет вид [1]

$$u(t) = A(t)H[\Phi(t)]. \quad (1)$$

Известных авторам практических предложений несинусоидальных переносчиков всего два — функции Уолша [2, 3] и полиномы Эрмита [4, 5].

Авторы предлагают для организации информационного обмена использовать переносчик, моделью которого служит один из классических ортогональных полиномов Якоби — многочлен Чебышёва первого рода:

$$T_n(x) = \cos[n \arccos(x)], \quad (2)$$

где $x = \frac{2t}{\tau_n}$, $-1 \leq x \leq 1$; $n = 1, 2, \dots$ — номер сигнала.

Временные и спектральные диаграммы предлагаемого носителя представлены на рис. 1, а и б соответственно.

Импульсы Чебышёва с увеличением номера сигнала ($n \geq 8$) являются радиоимпульсами с фазовой модуляцией, переходящей в частотную, а их односторонние спектры смещаются в область более высоких мгновенных частот при возрастании номера сигнала.

От классических полиномов $T_n(x)$, широко применяемых в прикладной математике, выбранная модель отличается тем, что не использует весовую функцию. Однако ортогональность свою импульсы сохраняют.

Огибающая импульса Чебышёва имеет прямоугольную форму, т. е. переносчик максимально использует площадь импульса.

Сравнивая соотношение (2) с моделью (1), отметим, что $A(t) = 1$, а полная фаза колебания $\Phi(t) = n \arccos \frac{2t}{\tau_n}$.

Модель (2) является тригонометрической формой полинома Чебышёва первого рода, поэтому назовем выбранный переносчик полиномиальным.

Мгновенная частота импульса Чебышёва определяется как производная от полной фазы

$$|f(t)| = \frac{n}{\pi \tau_n \sqrt{1 - \left(\frac{2t}{\tau_n}\right)^2}} \quad (3)$$

и зависит от двух параметров — номера сигнала n и его длительности τ_n (рис. 2).

Параметры графика соответствуют частоте сантиметрового диапазона. Гармоники наивысших частот дают малый вклад в энергетику импульса.

N -битный символ формируется путем простого суммирования импульсов Чебышёва с возрастающими номерами. Импульсы, кодирующие двоичную «1», имеют нулевую начальную

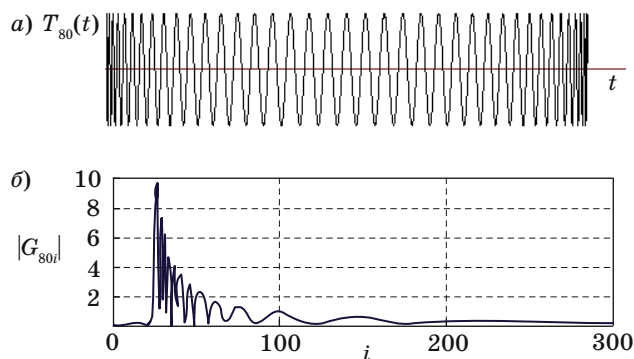


Рис. 1. Импульс Чебышёва и фурье-спектр импульса Чебышёва для $n = 80$

фазу, импульсы, кодирующие двоичный «0», — фазу π .

Такая кодировка позволяет обеспечить наилучшую из возможных помехоустойчивость. Результат суммирования показан на рис. 3.

Сформированный импульс имеет такое же распределение мгновенных частот, как и его составляющие (ср. рис. 1, а и 3). Фурье-спектр сформированного импульса представлен на рис. 4.

Начальная частота спектра, рассчитанная по соотношению (3) при $t = 0$, равна 964 МГц, а оценки частоты спектра при уровне гармоник, равном -20 и -40 дБ, имеют значения 1,96 и 9,517 ГГц соответственно. Такие параметры определяют сформированный импульс как сверхширокополосный (UWB) сигнал.

Таким образом, в результате объединения всех разрядов информации (двоичных сигналов) в одном импульсе, который по связной терминологии называют также символом, передается символ, содержащий N двоичных разрядов.

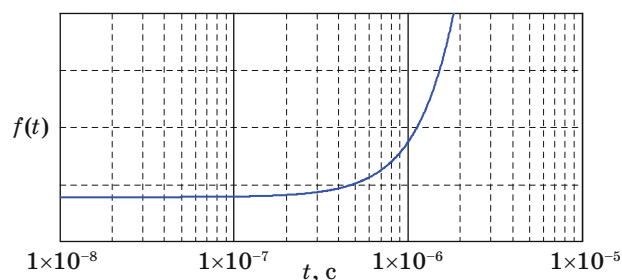


Рис. 2. Изменение мгновенной частоты в импульсе Чебышёва

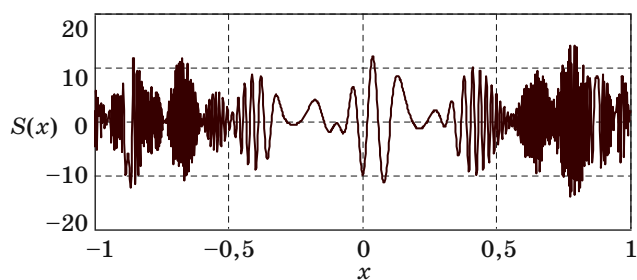


Рис. 3. Импульс, содержащий 48-битный символ

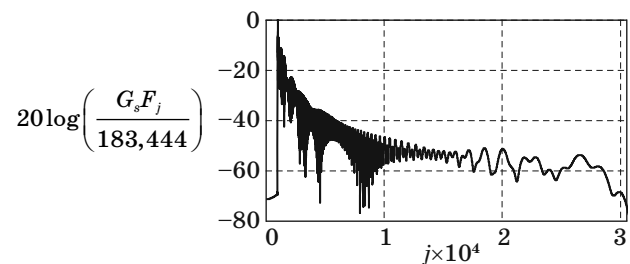


Рис. 4. Фурье-спектр сформированного символа

Объем передаваемой информации в единицу времени в двоичных символах достигает величины [6]

$$R = \frac{\log_2 L}{T} = F_T \log_2 L,$$

где L — число уровней, из которых можно производить выбор в каждом такте; T — длительность тактового интервала.

Скорость передачи нашего символа [бит/с] зависит от количества двоичных единиц информации в импульсе. При $N = 32$ $R = \frac{5}{T}$ [бит/с].

Например, если тактовые импульсы идут с частотой 33 МГц (принята в ЭВМ Багет [7]), то при $N = 48$ $R = \log_2 48 \cdot 33 \cdot 10^6 = 5,585 \cdot 33 \cdot 10^6 = 184$ Мбит/с.

Способ обработки сигнала на приемном пункте

В пункте обработки производится преобразование принятого импульса в цифровой код. Для этого применяем функциональное квантование [8], в соответствии с которым тактовые импульсы, подаваемые на аналого-цифровой преобразователь (АЦП), имеют Δt , изменяющиеся по закону косинуса (рис. 5).

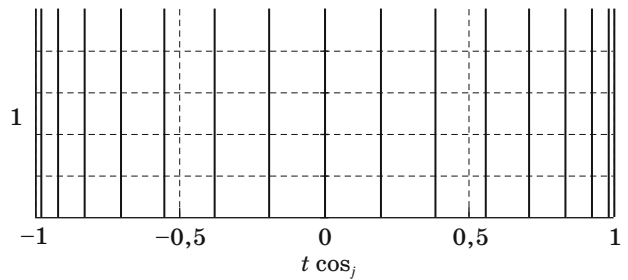
Такая дискретизация позволяет превратить принятый сигнал в сумму гармоник¹. Для этой реализации, записанная в регистр с выхода АЦП, считывается в обычном линейном времени. Результат этих подготовительных действий с импульсом, представленным на рис. 3, показан на рис. 6, а.

Теперь обрабатываемый символ состоит не из суммы импульсов Чебышёва $T_n(x)$, а из суммы гармоник $\cos(nx)$, его фурье-спектр показан на рис. 6, б.

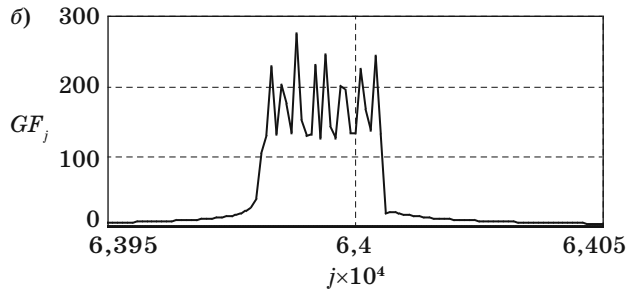
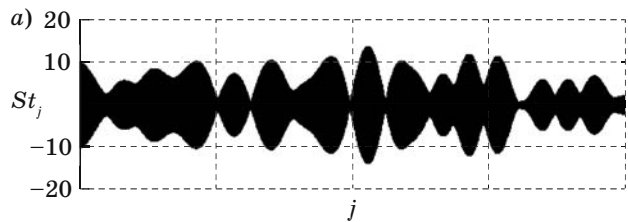
К этой сумме добавляем зеркальную копию [8] и применяем стандартную процедуру быстрого преобразования Фурье для получения сообщения в параллельном коде уже в базе Чебышёва. Результат обработки процедурой быстрого преобразования фурье-импульса (см. рис. 6, а) показан на рис. 7. Здесь каждая позиция, начиная с номера 3030, соответствует двоичному нулю при отрицательной полярности и двоичной единице при положительной полярности.

Для оценки помехоустойчивости предлагаемой специальной системы обмена данными в ЛНС проведено моделирование обработки сигнала, являющегося 64-битным символом при воздействии аддитивной шумовой помехи с гауссовым распределением плотности вероятности.

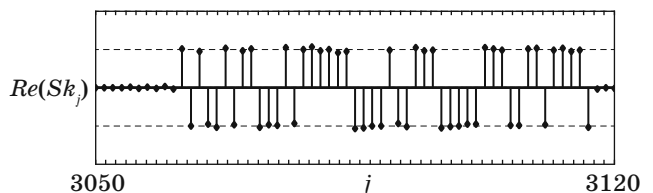
¹ График полинома Чебышёва первого рода — это проекция гармоники, описываемой $\cos[\Phi(t)]$, на цилиндр.



■ Рис. 5. Иллюстрация импульсов нелинейного времени для 16 тактов



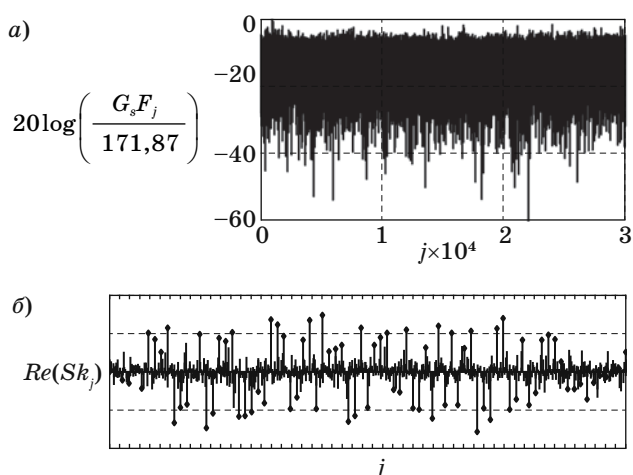
■ Рис. 6. Преобразованный в сумму гармоник 48-битный символ (а) и его фурье-спектр (б)



■ Рис. 7. Спектральная диаграмма напряжения, являющегося суммой 48 классических ортогональных полиномов Чебышёва первого рода с номерами от $n = 3030$ до $n = 3077$, в базе Чебышёва

Фурье-спектр такого импульса при $\sigma_0 = 5,618$ (отношению сигнал/помеха соответствуют -15 дБ) представлен на рис. 8, а, а спектр в базе Чебышёва — на рис. 8, б.

На рис. 8, б наблюдаем, что в результате воздействия помехи происходит как уменьшение амплитуды бита, являющегося составляющей чебышёвского базиса, так и ее увеличение. Выставив уровень порога для положительных и отрицательных импульсов, считываем передаваемую информацию.



■ **Рис. 8.** Фурье-спектр напряжения (а) и спектральная диаграмма напряжения в базисе Чебышёва (б), являющегося суммой 64 классических ортогональных полиномов Чебышёва первого рода с номерами от $n = 3030$ до $n = 3093$, при воздействии аддитивной шумовой помехи ($\sigma_0 = 5,618$)

Ошибкой, появляющейся при воздействии помехи, считается изменение знака чебышёвской составляющей спектра с плюса на минус и с минуса на плюс в любом бите из 64.

Для оценки вероятности ошибки проведено по 64 опыта обработки сигнала, являющегося 64-битным символом с шумом, для каждого отношения сигнал/шум, соответствующего $-0,5$; $-1,0$; $-1,5$; $-2,0$ дБ.

Результаты представлены на рис. 9. Оценка вероятности ошибки производилась на один бит информации. При помехе, равной сигналу, ошибки не обнаружены. При отношении сигнал/шум, равном $-0,5$ дБ, появились единичные ошибки в отдельных битах.

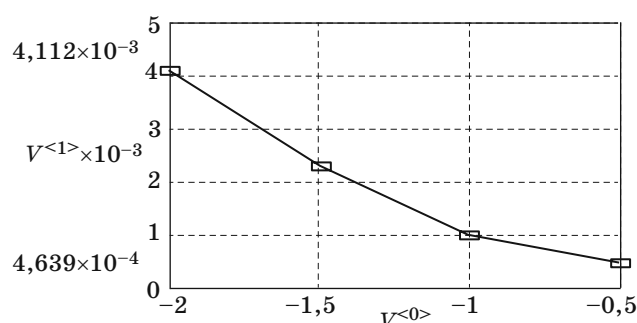
Несколько двойных ошибок имели место только при отношении сигнал/шум, равном -2 дБ.

Сравнивая полученный результат с теоретическими оценками помехоустойчивости современных систем выделения сигнала [9], констатируем лучшую помехоустойчивость предлагаемого метода. Действительно, значение вероятности битовой ошибки, равное 10^{-3} в системах с квадратурной амплитудной модуляцией (КАМ-64), достигается при отношениях сигнал/шум более 16 дБ [9].

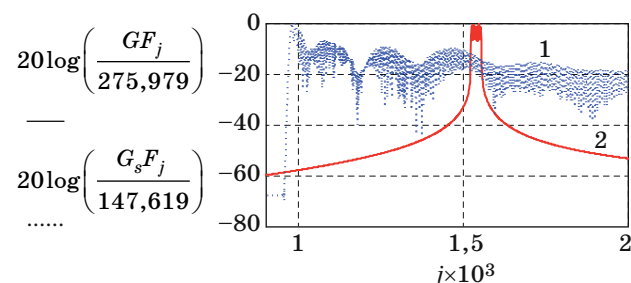
При практической реализации специальной системы передачи данных следует учесть характеристику реального канала связи, которая может ухудшить полученные оценки.

Физическая природа выигрыша проиллюстрирована на рис. 10, где представлены фурье-спектры принятого и дискретизированного импульсов с оценками значений по частотной оси.

Начальное значение частоты спектра сформированного импульса, рассчитанное по соотноше-



■ **Рис. 9.** Результат оценки помехоустойчивости сигнала, являющегося суммой 64 импульсов Чебышёва 1-го рода с номерами от $n = 8$ до $n = 71$, при воздействии аддитивной шумовой помехи с гауссовым законом распределения



■ **Рис. 10.** Сравнение фурье-спектров сформированного и обработанного импульсов: 1 — спектр суммы импульсов Чебышёва; 2 — спектр суммы гармоник

нию (3), в 1,6 раза меньше центральной частоты спектра импульса на выходе АЦП.

Другая особенность — практически прямоугольная форма спектра. Оценка ширины спектра составляет 35 МГц. Главный же эффект в том, что уровень мешающих гармоник стал после обработки на 40 и более децибел меньше. За счет этого и происходит уменьшение влияния шума и широкополосной помехи.

Заключение

Система формирования и обработки, основанная на системе полиномиальных переносчиков, при организации информационного обмена навигационных постов и объекта навигации в активно-пассивной системе позволяет получить следующие положительные эффекты:

- вести обмен данными в ЛНС при отношении сигнал/шум меньше единицы;
- обеспечить значение вероятности битовой ошибки, равное 10^{-3} при отношении сигнал/шум -1 дБ.

Предлагаемые методы кодирования и обработки обеспечивают выигрыш в помехоустойчивости, увеличение скорости обмена данными

и скрытности информационного обмена, передача большего объема информации в той же полосе частот традиционного гармонического базиса.

Такое кодирование позволяет также избавиться от межсимвольной интерференции [9, 10], причина которой здесь исключена.

Литература

1. Агеев Д. В. Интенсивность сигнала с несинусоидальными переносчиками // Радиотехника. 1975. Т. 30. № 4. С. 1–8.
2. Harmuth H. F. *Transmission of Information by Orthogonal Functions*. — Berlin, Heidelberg, New York, 1970. — 262 p.
3. Агаев Ф. Г. Обработка сигналов синхронной системой передачи информации // Петербургский журнал электроники. 2002. № 2. С. 44–48.
4. A Novel Pulse Design Based on Hermite Function for UWB Communications // The Journal of China Uni-

- versities of Posts and Telecommunications. 2006. Vol. 13. N 1. P. 49–52.
5. Gomes J., Mishra B. K. Image Transmission Using Hermite Based UWB Communication with Simple Receiver // Intern. Journal of Ubiquitous Engineering. Oct. 2011. Vol. 6. N 4. P. 13–28.
6. Першин В. Г. Формирование и генерирование сигналов в цифровой радиосвязи. — Минск: Новое знание; М.: ИНФРА-М, 2015. — 614 с.
7. Изделие 1Б33. А-ТГ2.009.004. ИЭ. — М.: МО, 1983. — 52 с.
8. Черенок Н. Г. Системы цифровой обработки сигналов. Основы цифровой обработки. Ч. 1. — СПб.: Военный университет ПВО (филиал), 2001. С. 50–56.
9. Proakis J. G. *Digital Communications*. — McGraw-Hill, 1995. — 1004 p.
10. Сергиенко А. Б. Цифровая связь. — СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2012. — 163 с.

UDC 621.391.8

doi:10.15217/issn1684-8853.2016.6.91

Information Exchange between Navigation Posts and a Navigation Object in an Active-Passive System

Ulianov G. N.^a, Dr. Sc., Tech., Professor, gulianov@yandex.ru

Cherenok N. G.^a, PhD, Tech., Associate Professor, ncherenok@ya.ru

Ignatiev I. O.^a, Lecturer, ioi73@mail.ru

^aMikhailovskaya Military Artillery Academy, 22, Komsomola St., 195009, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: Extensive use of air drones performing tasks in a limited space requires special data transmission channels which can function in a purposeful noise environment. **Purpose:** The goal is developing noise-proof methods of forming and transmitting messages in such data transmission channels. **Results:** We have offered methods which modify the classic system of encoding and processing a discrete message. They allow you to transmit an N-bit symbol at one time cycle, decoding the transmitted message in Chebyshev basis. Pulses described by classical orthogonal Chebyshev polynomials of the first kind were chosen as a carrier, different from a harmonic one. An N-bit symbol is formed by simple summarization of Chebyshev pulses with ascending numbers. Pulses encoding “1” have a zero initial phase, while pulses encoding “0” are antiphase. A received N-bit symbol is discretized by an analog-digital converter with timing pulses complying with the cosine law, and processed by a standard fast Fourier transform program. At the output of the processing scheme, we have a parallel code made of positive and negative pulses corresponding to the transmitted message. The estimated probability of a bit error for the ratio $U_s/U_n = -1$ dB when transmitting a 64-bit symbol corresponds to an error of the existing data transmission systems at $U_s/U_n > +6$ dB. **Practical relevance:** The proposed methods of data encoding and processing, beside the gain in interference immunity, can increase the speed of data exchange and allow you to get rid of inter-symbol interference, the cause of which is simply excluded here. This provides the possibility to transmit a higher amount of information in the same frequency band of the traditional harmonic basis.

Keywords — Non-Sinusoidal Polynomial Carrier, Single Pulse Transmission, Chebyshev Processing.

References

1. Ageev D. V. The Intensity of the Signal is not Sinusoidal Vector Control. *Radiotekhnika*, 1975, vol. 30, no. 4, pp. 1–8 (In Russian).
2. Harmuth H. F. *Transmission of Information by Orthogonal Functions*. Berlin, Heidelberg, New York, 1970. 262 p.
3. Agaev F. G. Signal Processing Simultaneous Information Transfer System. *Peterburgskii zhurnal elektroniki*, 2002, no. 2, pp. 44–48 (In Russian).
4. A Novel Pulse Design Based on Hermite Function for UWB Communications. *The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications*, 2006, vol. 13, no. 1, pp. 49–52.
5. Gomes J., Mishra B. K. Image Transmission Using Hermite Based UWB Communication with Simple Receiver. *International Journal of Ubiquitous Engineering*, October 2011, vol. 6, no. 4, pp. 13–28.
6. Pershin V. G. *Formirovanie i generirovanie signalov v tsifrovoi radiosvazi* [The Formation and Generation of Signals in Digital Radio]. Minsk, Novoe znanie Publ.; Moscow, INFRA-M Publ., 2015. 614 p. (In Russian).
7. *Izdelie 1B33. A-TG2.009.004. IE* [Product 1B33. A-TG2.009.004. IE]. Moscow, Ministerstvo oborony Publ., 1983. 52 p. (In Russian).
8. Cherenok N. G. *Sistemy tsifrovoi obrabotki signalov. Osnovy tsifrovoi obrabotki. Ch. 1* [System of Digital Processing of Signals. Fundamentals of Digital Processing. Part 1]. Saint-Petersburg, Voennyi universitet PVO Publ., 2001, pp. 55–56 (In Russian).
9. Proakis J. G. *Digital Communications*. McGraw-Hill, 1995. 1004 p.
10. Sergienko A. B. *Tsifrovaia sviaz'* [Digital Communications]. Saint-Petersburg, “LETI” Publ., 2012. 163 p. (In Russian).

УДК 519.25

doi:10.15217/issn1684-8853.2016.6.96

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИНЕЙНОЙ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ СВЯЗИ В МНОГОМЕРНОМ МЕТОДЕ ТОЧЕЧНЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ

В. С. Попукайло^{а, 1}, преподаватель

^аПриднестровский государственный университет им. Т. Г. Шевченко, Инженерно-технический институт, Тирасполь, Молдова

Постановка проблемы: современное производство имеет тенденцию к уменьшению объемов выборок при проведении контрольных испытаний. Существующие методы нахождения линейного коэффициента корреляции не дают необходимой точности результатов в случаях выборок малого объема. **Цель:** анализ возможностей применения коэффициента корреляции Пирсона после виртуального увеличения исходной таблицы данных многомерным методом точечных распределений. **Результаты:** исследования показали, что применение виртуального увеличения таблицы исходных данных, основанного на методе точечных распределений, позволяет избежать ошибочного определения слабой отрицательной вместо слабой положительной линейной корреляционной связи при анализе многомерных выборок малого объема. Кроме того, предложенная методика дает возможность сузить разброс оценки значений коэффициентов корреляции Пирсона, что может быть применено для дополнительной оценки величины линейной корреляционной связи при построении математических моделей по пассивным данным на ранних этапах исследования. Новизна подхода состоит в использовании информации о каждой отдельной реализации малой выборки с учетом знаний о видах законов распределения одномерных случайных величин. Формирование виртуально увеличенной таблицы (состыковка значений) производится по максимальному уровню плотности вероятности. **Практическая значимость:** многомерный метод точечных распределений может применяться для оперативного управления технологическими процессами на этапе накопления информации об исследуемом объекте.

Ключевые слова — корреляция, математическое моделирование, метод точечных распределений, малая выборка.

Введение

При решении задач контроля качества в промышленных производствах большой интерес представляет задача определения значимости корреляционной связи между исследуемыми величинами, так как отбор сильносвязанных факторов позволяет существенно сократить количество браковочных контрольных операций при сохранении того же качества изделия. Насколько связь между случайными величинами близка к строго линейной, показывает коэффициент корреляции. Для его применения исходная информация должна отражать наиболее характерные черты изучаемой совокупности, а число наблюдений должно быть достаточно большим. Однако в задачах технического контроля не всегда можно получить соответствующий набор данных для их последующего анализа.

В предыдущей работе автора [1, с. 27] было показано, что процедура «бутстрэппинга» [2, с. 135] и применение метода точечных распределений [3, с. 75] не увеличивают точности при нахождении наивероятнейшего коэффициента корреляции Пирсона. Более того, «бутстрэппинг» увели-

чивает разброс получаемых значений, а нахождение коэффициента корреляции по методу Чебышева после применения метода точечных распределений и вовсе не позволяет с точностью определить наличие высокого уровня связи. По этим причинам встал вопрос о правомерности нахождения коэффициентов корреляции после построения виртуальной увеличенной таблицы данных в многомерном методе точечных распределений (ММТР) [4, с. 207].

Методы исследования

Для поиска ответа на этот вопрос было решено из массива данных большого объема, полученных при производстве кристаллов интегральных микросхем, распределенных по нормальному закону распределения, с помощью таблицы равномерно распределенных случайных величин получить выборки по 10 элементам. Данный объем определен не случайно, так как в промышленности существуют производства, по технологическим особенностям которых невозможно обеспечить большой объем контрольной выборки. Например, при производстве кристаллов интегральных микросхем из-за специфики топологии пластин на них имеются от пяти до 10 тестовых ячеек, измерения в которых должны с некоторой вероятностью отражать поведение одноименных параметров 400–5000 рабочих кристаллов.

На следующем шаге к полученной выборке был применен алгоритм многомерного метода

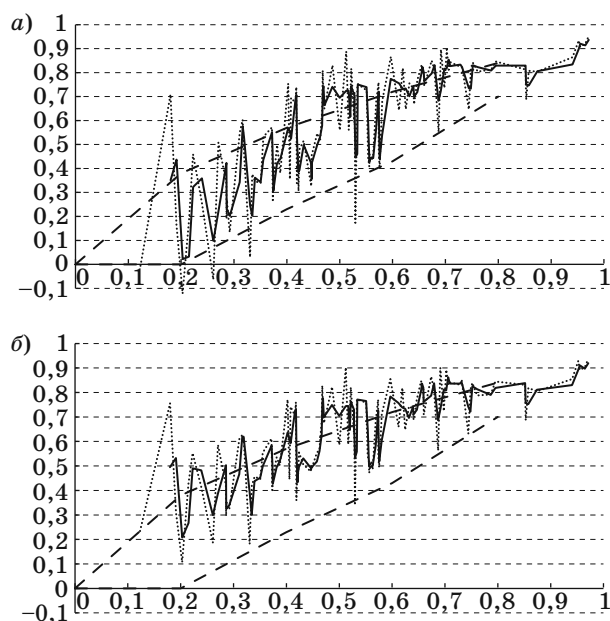
¹ Научный руководитель — доктор технических наук, профессор кафедры информационных технологий и автоматизированного управления производственными процессами Инженерно-технического института Приднестровского государственного университета им. Т. Г. Шевченко Ю. А. Долгов.

точечных распределений [4, с. 207]. Таким образом, был получен новый, виртуально увеличенный массив данных, содержащий 280 строк. После чего были рассчитаны коэффициенты парной корреляции Пирсона для исходного массива данных, для массива извлеченных данных малого объема и для массива данных, полученных после применения ММТР.

Анализ результатов корреляционного анализа таблиц исходных и виртуально увеличенных данных

Для сравнения результатов приведем графики, на которых по оси x располагаются значения коэффициентов корреляции Пирсона, полученные по первоначальной выборке большого объема, а на оси y — коэффициенты корреляции по малой выборке (рис. 1, а) и коэффициенты, полученные после применения процедуры ММТР (рис. 1, б). На графиках точечно-пунктирная линия показывает результаты произведенных расчетов; сплошной линией обозначается линия тренда, аппроксимируемая по двум точкам, которая хорошо отражает тенденцию искомой зависимости; штрихпунктирными линиями на графиках обозначены доверительные интервалы для коэффициента корреляции, полученного по первоначальной выборке [5, с. 416].

Анализ полученных результатов дает основания утверждать, что применение многомерного метода точечных распределений снижает разброс между рассчитанными коэффициентами корреляции, особенно в случае слабых связей, при



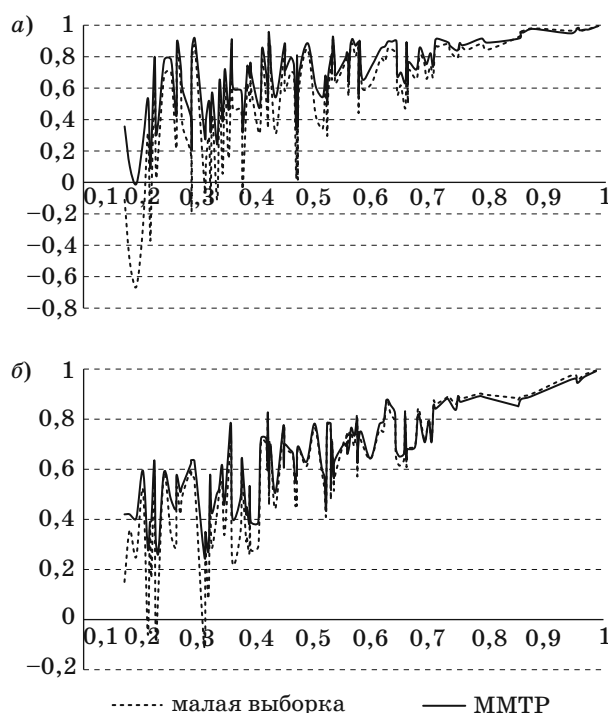
■ Рис. 1. Коэффициент корреляции Пирсона по малой выборке (а) и после применения ММТР (б)

общем сохранении вида линии тренда. При этом отмечается тенденция к завышению рассчитанного значения по сравнению с коэффициентом корреляции, рассчитанным по малой выборке, из-за чего достоверно распознать сильную линейную связь возможно только при получении величины $r > 0,75$. Необходимо обратить внимание на тот факт, что расчет коэффициента корреляции Пирсона по малой выборке в ряде случаев показывал слабую отрицательную связь в случаях слабой положительной. Этот недостаток усугубляется после применения виртуального увеличения выборки «бутстрэппингом» [1, с. 30], но он исчезает, если увеличивать объем данных многомерным методом точечных распределений.

Проведенные исследования показали, что разработанная методика дает более точные показатели при оценивании линейного коэффициента корреляции, вне зависимости от исследуемого объема выборки.

В качестве примера приведем графики отношения оцениваемого коэффициента корреляции по выборкам малого объема и оцениваемого коэффициента корреляции после виртуального увеличения выборки многомерным методом точечных распределений (значения по оси y) к коэффициенту корреляции генеральной совокупности (значения по оси x) для объема выборки $n = 6$ (рис. 2, а) и $n = 16$ (рис. 2, б).

Приведенные графики подтверждают, что при уменьшении объема исходных данных оценива-



■ Рис. 2. Оценка коэффициентов корреляции при $n = 6$ (а) и $n = 16$ (б)

ние выборочного коэффициента корреляции приводит к большим ошибкам, и его значение не может с достаточной достоверностью подтверждать наличие значимой наблюдаемой линейной связи между исследуемыми случайными величинами. Применение разработанной методики позволяет сузить доверительный интервал при оценивании коэффициента корреляции Пирсона по данным малого объема, а также избежать ошибочного определения отрицательной корреляционной связи.

Заключение

Таким образом, можно рекомендовать рассчитывать коэффициент корреляции после виртуального увеличения объема выборки ММТР. В случае обнаружения в выборках $n > 10$ линей-

ных корреляционных связей, $r > 0,75$, также следует признать данную наблюдаемую связь сильной и значимой. В данных объемом $10 \geq n \geq 7$ наблюдаемую связь следует признать значимой при $r \geq 0,8$. При объеме исследуемой выборки $n \leq 6$ значение порогового коэффициента корреляции следует принять на уровне $r = 0,9$.

Таким образом, применение виртуального увеличения таблицы исходных данных предложенным методом, в отличие от методов «бутстрэппинга», позволяет сохранить знание о виде закона распределения случайной величины и о величине линейной корреляционной связи между исследуемыми факторами, что дает возможность принимать более обоснованные решения по малому количеству исходных данных, а также улучшить качество статистического оценивания параметрическими методами.

Литература

1. Попукайло В. С. Исследование линейной корреляционной связи в парных выборках малого объема // *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*. 2016. № 1. С. 27–32. doi:10.15222/ТКЕА2016.1.27
2. Efron B. *The Jackknife, the Bootstrap and Other Resampling Plans*. — Philadelphia, Pa.: SIAM, 1982. — 135 p.
3. Столяренко Ю. А. Метод точечных распределений // *Радиоэлектронные и компьютерные системы*. 2012. № 6(58). С. 75–77.
4. Popukaylo V. Analysis of Statistical Modeling Methods for Small-Volume Samples // *Telecommunications, Electronics and Informatics: proc. of the 5th Intern. Conf., Chişinău, Moldova, May 20–23, 2015*. P. 207–211.
5. Болшев Л. Н., Смирнов Н. В. *Таблицы математической статистики*. — М.: Наука, 1983. — 416 с.

UDC 519.25

doi:10.15217/issn1684-8853.2016.6.96

Linear Correlation Communication in Multidimensional Method of Point Distributions

Popukaylo V. S.^a, Lecturer, vsp.science@gmail.com

^aPridnestrovian State University, Engineering School, 2a, Vosstania St., 3300, Tiraspol, Moldova

Introduction: Modern production tends to decrease the volume of samples during routine tests. The existing methods of finding the linear correlation coefficient do not provide the necessary precision of the results when the sample volume is small. **Purpose:** We analyze the possibilities to apply the Pearson correlation coefficient after the virtual growth of the initial data table using the multidimensional method of point distributions. **Results:** The study showed that the usage of virtual growth of the original data table based on the point distribution method allows you to avoid a wrong determination of the linear correlation communication as weak negative instead of weak positive when analyzing small-volume multidimensional samples. Besides, the proposed method allows you to narrow down the rating spread of Pearson correlation coefficient values which can be used to additionally assess the size of the linear correlation communication when creating mathematical models according to passive data at the early steps of the research. The novelty of this approach is using the information on each single small-sample implementation, relying on the knowledge about the types of one-dimensional random variable distribution laws. The formation of a virtually increased table (joining of values) is performed by the maximum level of the probability density. **Practical relevance:** The multidimensional method of pointed distributions can be applied to control technological processes in real time at the stage of accumulating the information about the studied object.

Keywords — Correlation, Mathematical Modeling, Method of Point Distributions, Small-Volume Sample.

References

1. Popukaylo V. S. The Linear Correlation Research in Paired Small Volume Samples. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature*, 2016, no. 1, pp. 27–32 (In Russian). doi:10.15222/ТКЕА2016.1.27
2. Efron B. *The Jackknife, the Bootstrap and Other Resampling Plans*. Philadelphia, SIAM, 1982. 135 p.
3. Stolyarenko Y. A. Method of Point Allocations. *Radioelektronnye i komp'yuternyye sistemy*, 2012 no. 6(58), pp. 75–77 (In Russian).
4. Popukaylo V. S. Analysis of Statistical Modeling Methods for Small-Volume Samples. *Proc. of the 5th Intern. Conf. "Telecommunications, Electronics and Informatics"*, Chişinău, Moldova, 20–23 May, 2015, pp. 207–211.
5. Bol'shev L. N., Smirnov N. V. *Tablitsy matematicheskoy statistiki* [Tables of Mathematical Statistics]. Moscow, Nauka Publ., 1983. 416 p. (In Russian).

УДК 681.326.7

doi:10.15217/issn1684-8853.2016.6.99

МОДЕЛИРОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЖЕСТКОСТИ ЗУБЧАТОГО ЗАЦЕПЛЕНИЯ

В. А. Голубков^а, канд. техн. наук, доцент
В. Ф. Шишлаков^а, доктор техн. наук, профессор
Т. Т. Шарафудинов^а, преподаватель
И. Н. Лукьяненко^а, канд. техн. наук, доцент

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

Постановка проблемы: существующие математические модели расчета вибрации редукторов с учетом некоторых погрешностей изготовления их элементов, призванные повысить надежности редукторов, не достаточно учитывают влияния погрешностей изготовления и сборки на флуктуацию жесткостных параметров зубчатых зацеплений. **Цель исследования:** математическое моделирование спектральных характеристик изменения жесткости зубчатого зацепления в зависимости от погрешностей шага зубчатых колес. **Результаты:** математическое моделирование спектральных характеристик изменения жесткости зубчатого зацепления в зависимости от погрешности шага зубчатых колес показало, что флуктуация жесткости проявляется не только на зубчатых частотах вращения колес, а также на комбинационных частотах. Соответственно, в спектре вибрации зубчатого зацепления будут содержаться гармоники не только возмущающих сил, но и комбинационные гармоники от этих сил и флуктуации жесткости. **Практическая значимость:** предложенная математическая модель позволяет более точно проводить расчет вибрации редукторов, оценку динамических нагрузок в зонах контакта элементов, а также значительно точнее оценивать ресурс работы и надежность редуктора. На стадии проектирования позволяет нормировать технологические погрешности элементов для достижения заданного ресурса работы.

Ключевые слова — зубчатое зацепление, жесткость, моделирование, спектральные характеристики.

Введение

Зубчатые зацепления входят в состав редукторов специального и бытового назначения. Наличие вибрации зубчатых зацеплений ощутимо влияет на точность исполняемых функций, а также снижает качественные характеристики, такие как надежность и ресурс [1].

Точность изготовления элементов зубчатых зацеплений на стадии производства, а также дефекты, которые возникают в процессе эксплуатации, вследствие износа, значительно влияют на характеристики жесткости зубчатых зацеплений и, как следствие, увеличивают виброактивность редукторов [2–4], повышают динамические нагрузки в зонах контакта элементов редуктора, снижают ресурс его работы [5].

Следовательно, анализ спектральных характеристик жесткости зубчатых зацеплений в зависимости от погрешностей изготовления зубчатых колес приобретает большую актуальность.

Деформации и функции контактирования в зубчатом зацеплении

Для анализа характеристик жесткости зацепления необходимо рассмотреть потенциальную энергию деформации зубьев. Потенциальная энергия деформации зубьев в зацеплении ше-

стерни и колеса носит нелинейный характер от обобщенных координат [1–5]:

$$\Pi = \frac{1}{p} \sum_{iq} B \delta_{iq}^p e(\delta_{iq}) \varepsilon_i(t) \varepsilon_q(t),$$

где B — параметр, характеризующий упругие свойства шестерни и колеса; δ_{iq} — полная деформация в зацеплении i -го зуба шестерни и q -го зуба колеса;

$$e(\delta_{iq}) = \begin{cases} 1, & \delta_{iq} > 0 \\ 0, & \delta_{iq} \leq 0 \end{cases};$$

$\varepsilon_i(t)$, $\varepsilon_q(t)$ — функции контактирования i -го зуба шестерни и q -го зуба колеса соответственно.

Полная деформация в зацеплении δ_{iq} функционально связана с координатами вибрации X_{kj} следующим образом [5]:

$$\delta_{iq} = \delta_{0iq} + \sum_{kj} (-1)^{k+1} a_{kj} x_{kj} - \Delta h,$$

где δ_{0iq} — статическая деформация зацепления; a_{kj} — конструктивный параметр k -го колеса в j -м направлении ($k = 1$ — шестерня, $k = 2$ — колесо); Δh — функция профильной ошибки зацепления.

Выражение для профильной ошибки зацепления записывается в виде

$$\Delta h = \sum_l h_{il} \cos \left[\omega_1 t + \frac{2\pi l}{z_1} (i-1) + \varphi_{il} \right] -$$

$$-\sum_p h_{qp} \cos \left[p\omega_2 t + \frac{2\pi p}{z_2}(q-1) + \varphi_{qp} \right],$$

где h_{il} — амплитудное значение профильной ошибки i -го зуба шестерни на частоте $l\omega_1$; h_{qp} — амплитудное значение профильной ошибки q -го зуба колеса на частоте $p\omega_2$; ω_1, ω_2 — угловые частоты вращения шестерни и колеса соответственно.

Поскольку контакт зубьев носит импульсный характер, то функции контактирования $\varepsilon_i(t), \varepsilon_q(t)$ могут быть заданы в виде

$$\varepsilon_i(t-t_i) = \begin{cases} 1 & \text{при } |t-t_i| < \frac{T}{2}; \\ 0 & \text{при } |t-t_i| \geq \frac{T}{2}; \end{cases}$$

$$\varepsilon_q(t-t_q) = \begin{cases} 1 & \text{при } |t-t_q| < \frac{T}{2}; \\ 0 & \text{при } |t-t_q| \geq \frac{T}{2}; \end{cases}$$

где t_i и t_q — моменты зацепления i -го зуба шестерни и q -го зуба колеса соответственно:

$$t_i = \frac{2\pi}{\omega_1} \frac{i-1}{z_1};$$

$$t_q = \frac{2\pi}{\omega_2} \frac{q-1}{z_2};$$

T — длительность контактирования i -го и q -го зубьев:

$$T = \frac{2\pi\varepsilon_a}{\omega_1 z_1},$$

ε_a — коэффициент перекрытия:

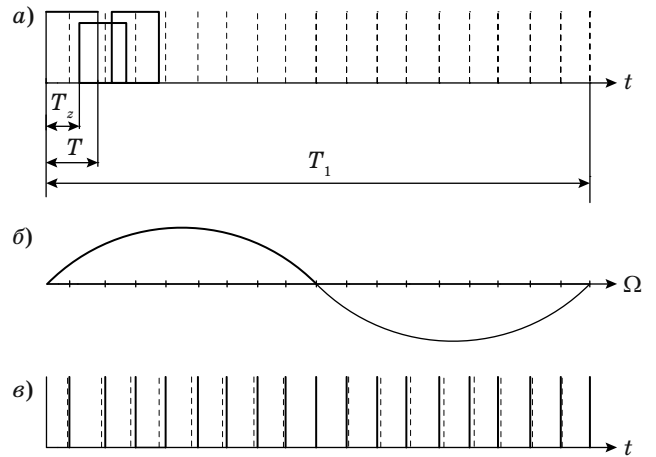
$$\varepsilon_a = \left[\left(\frac{z_1^2}{4} \sin^2 \alpha + z_1 + 1 \right)^{\frac{1}{2}} + \left(\frac{z_2^2}{4} \sin^2 \alpha + z_2 + 1 \right)^{\frac{1}{2}} - \frac{z_1 + z_2}{2} \sin \alpha \right] / \pi \cos \alpha,$$

α — угол зацепления.

Функцию контактирования i -го зуба шестерни можно представить в виде последовательности импульсов (рисунок, а), где T_1 — период контактирования i -го зуба. При наличии погрешности шага, изменяющейся по синусоидальному закону с частотой Ω_i (рисунок, б), функция контактирования изменяется (рисунок, в) и описывается выражением

$$\varepsilon_i(t) = A_{0i} + \sum_{n=1}^{\infty} A_n J_{0i} \left(\frac{\Delta f'_{mi}}{r_1} \right) \times$$

$$\times \cos \left(n\omega_1 t + 2\pi n \frac{i-1}{z_1} + \varphi_n \right) + \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{k_i=1}^{\infty} A_n J_{ki} \left(k_i \frac{\Delta f'_{mi}}{r_1} \right) \times$$



■ Моделирование погрешностей зубчатого зацепления: а — идеальная функция контактирования; б — функция, описывающая погрешность шага; в — функция контактирования при наличии погрешности шага

$$\times \cos \left(n\omega_1 t + 2\pi n \frac{i-1}{z_1} + \varphi_n + k_i \Omega_i t_i \right) +$$

$$+ \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{k_i=1}^{\infty} (-1)^{k_i} A_n J_{ki} \left(\frac{k_i \Delta f'_{mi}}{r_1} \right) \times$$

$$\times \cos \left(n\omega_1 t + 2\pi n \frac{i-1}{z_1} + \varphi_n - k_i \Omega_i t_i \right),$$

где $A_{0i} = \frac{T\omega_1}{2\pi}$; $A_n = \left(\frac{\omega_1 T}{2\pi} \right) \sin c \left(\frac{n\omega_1 T}{2} \right)$; $\varphi_n = \frac{n\omega_1 T}{2}$;

Ω_i — частота изменения погрешности шага шестерни; $\Delta f'_{mi}$ — амплитудное значение погрешности шага; $J_{ki} \left(\frac{\Delta f'_{mi}}{r_1} \right)$ — функция Бесселя первого рода k_i -го порядка от аргумента $\Delta f'_{mi}/r_1$.

Конструктивный параметр B определяется выражением

$$B = \frac{2E}{3(1-\varepsilon^2)} \left(\frac{R_{l1} R_{l2}}{R_{l1} + R_{l2}} \right)^{\frac{1}{2}},$$

где ε — коэффициент Пуассона; E — модуль упругости; R_{lk} — радиус выступов рабочих поверхностей контактирующих зубьев k -го колеса:

$R_{lk} = \frac{2a_k k}{\pi}$, a_k — амплитуда k -й преобладающей гармоники разложения профиля зуба по ширине зубчатого венца в ряд Фурье.

Спектральные характеристики жесткости

Учитывая, что характер контактирования зубьев определяется значением статистической деформации δ_{0iq} , и используя линеаризацию

с помощью разложения в ряд Тейлора, обобщенные силы, действующие в зацеплении, запишем в виде

$$\begin{aligned}
 Q = & -\frac{d\Pi}{d\delta_{iq}} + F_{\text{ст}} = -\sum_{i,q} B\delta_{0iq}^{p-1} e(\delta_{0iq})\varepsilon_i(t)\varepsilon_q(t) - \\
 & - \sum_{i,k,q,p} (-1)^{k+1} B\alpha_{kj}x_{kj}(p-1)\delta_{0iq}^{p-1} e(\delta_{0iq})\varepsilon_i(t)\varepsilon_q(t) - \\
 & - \sum_{i,q} B \left[\sum_l h_{il} \cos \left[l\omega_1 t + \frac{2\pi l}{z_1}(i-1) + \varphi_{il} \right] - \right. \\
 & \left. - \sum_p h_{qp} \cos \left[p\omega_2 t + \frac{2\pi p}{z_2}(q-1) + \varphi_{qp} \right] \right] \times \\
 & \times \delta_{0iq}^{p-1} e(\delta_{0iq})(p-1)\varepsilon_i(t)\varepsilon_q(t) + F_{\text{ст}}, \quad (1)
 \end{aligned}$$

где $F_{\text{ст}} = M/r_1$ — статическая нагрузка в зацеплении, M — крутящий момент на валу шестерни; r_1 — радиус делительной окружности шестерни.

Из выражения (1) следует, что жесткость зацепления определяется из следующего соотношения:

$$C_3 = \sum_{i,k,q,p} (-1)^{k+1} (p-1) B \delta_{0iq}^{p-2} a_{kj} \varepsilon_i(t) \varepsilon_q(t).$$

Статистическая деформация δ_{0iq} находится из решения нелинейного уравнения

$$\sum_{i,q} B \delta_{0iq}^{p-1} e(\delta_{0iq}) \varepsilon_i(t) \varepsilon_q(t) - F_{\text{ст}} = 0. \quad (2)$$

Как видно из выражения (2), жесткость зубчатого зацепления определяется произведением функций контактирования. Спектральные характеристики произведения функций контактирования $\varepsilon_i(t)$, $\varepsilon_q(t)$ представлены в таблице с учетом того, что частоты изменения погрешности шага от зуба к зубу шестерни и колеса Ω_i , Ω_q кратны частотам вращения ω_1 и ω_2 соответственно.

Заключение

Разработанная модель расчета спектральных характеристик жесткости зубчатого зацепления учитывает погрешность шага нарезки зубьев колес редуктора. Установлено, что при возникновении погрешности шага, кроме зубцовых и кратных им частот, в спектре изменения жесткостей

■ Спектральные характеристики произведений функций контактирования

Частота	Амплитуда	Примечание
0	$z_1 z_2 A_{0i} A_{0q}$	—
$L\omega_z$	$z_1 z_2 A_{0q} A_{ni} J_{0i} \left(\frac{\Delta f' m_i}{r_1} \right)$	$n = lz_1$
$L\omega_z$	$z_1 z_2 A_{0i} A_{mq} J_{0q} \left(\frac{\Delta f' m_1}{r_2} \right)$	$m = lz_2$
$(l+p)\omega_z$	$z_1 z_2 A_{ni} A_{mq} J_{0i} \left(\frac{\Delta f' m_i}{r_1} \right) J_{0q} \left(\frac{\Delta f' m_q}{r_2} \right)$	$m = pz_2$ $n = lz_1$
$l\omega_z \pm k_i \omega_1$	$z_1 z_2 A_{0q} A_{ni} J_{k_i} \left(k_i \frac{\Delta f' m_i}{r_1} \right)$	$n = lz_1 \pm k_i$
$(l+p)\omega_z \pm k_i \omega_1$	$z_1 z_2 A_{ni} A_{mq} J_{k_i} \left(k_i \frac{\Delta f' m_i}{r_1} \right) J_{0q} \left(\frac{\Delta f' m_q}{r_2} \right)$	$m = pz_2$ $n = lz_1 \pm k_i$
$p\omega_z \pm k_q \omega_2$	$z_1 z_2 A_{0i} A_{mq} J_{k_q} \left(k_q \frac{\Delta f' m_1}{r_2} \right)$	$m = pz_2 \pm k_q$
$(p+l)\omega_z \pm k_q \omega_2$	$z_1 z_2 A_{ni} A_{mq} J_{0i} \left(\frac{\Delta f' m_i}{r_1} \right) J_{k_q} \left(k_q \frac{\Delta f' m_q}{r_2} \right)$	$n = lz_1$ $m = pz_2 \pm k_q$
$(p+l)\omega_z \pm k_i \omega_1 \pm k_q \omega_2$	$z_1 z_2 A_{ni} A_{mq} J_{k_i} \left(k_i \frac{\Delta f' m_i}{r_1} \right) J_{k_q} \left(k_q \frac{\Delta f' m_q}{r_2} \right)$	$n = lz_1 \pm k_i$ $m = pz_2 \pm k_q$
$(p+l)\omega_z \pm k_i \omega_1 \pm k_q \omega_2$	$z_1 z_2 A_{ni} A_{mq} J_{k_i} \left(k_i \frac{\Delta f' m_i}{r_1} \right) J_{k_q} \left(k_q \frac{\Delta f' m_q}{r_2} \right)$	$n = lz_1 \pm k_i$ $m = pz_2 \pm k_q$

зубчатого зацепления появляются комбинационные частоты

$$(l + p)\omega_z \pm k_i\omega_1 \pm k_q\omega_z; p\omega_z \pm k_q\omega_z; l\omega_z \pm k_i\omega_1,$$

где ω_z — зубцовая частота; l, p, k_i, k_q — целые числа 1, 2, 3... .

За счет погрешности шага в спектре вибрации редуктора появляется много дополнительных составляющих. В нем будут содержаться гармо-

ники не только возмущающих сил от неточности изготовления зубчатых зацеплений, но и комбинационные гармоники от этих сил и флуктуации жесткости. При увеличении погрешности шага происходит расширение спектра комбинационных частот изменения жесткости, увеличение вибрации, возрастание динамических нагрузок в местах контакта зубьев и сокращение ресурса работы.

Литература

1. Семенова Е. Г. Основы моделирования и диагностики антенных устройств бортовых комплексов. — СПб.: Политехника, 2003. — 186 с.
2. Голубков В. А. и др. Математическая модель расчета вибрации ступени редуктора / В. А. Голубков, А. О. Смирнов, Т. Т. Шарафудинов, И. Н. Лукьяненко // Информационно-управляющие системы. 2014. № 6. С. 87–92.
3. Голубков В. А., Голубков А. В., Шарафудинов Т. Т. Анализ вибрации зубчатых зацеплений при проскальзывании зубьев // Завалишинские

4. чтения'13: тр. конф., Санкт-Петербург, 8–12 апреля 2013 г. СПб.: ГУАП, 2013. С. 46–48.
4. Голубков В. А., Голубков А. В., Шарафудинов Т. Т. Анализ влияния процессов проскальзывания на вибрацию зубчатых зацеплений // Завалишинские чтения'14: тр. конф., Санкт-Петербург, 8–12 апреля 2014 г. СПб.: ГУАП, 2014. С. 101–104.
5. 5. Веркович Г. А. и др. Справочник конструктора точного приборостроения / Г. А. Веркович, Е. Н. Головенкин, В. А. Голубков и др. — Л.: Машиностроение, 1989. — 792 с.

UDC 681.326.7

doi:10.15217/issn1684-8853.2016.6.99

Modeling Spectral Characteristics of Gear Engagement Stiffness

Golubkov V. A.^a, PhD, Tech., Associate Professor, viktor-golubkov@yandex.ru

Shishlakov V. F.^a, Dr. Sc., Tech., Professor, svfmail@yandex.ru

Sharafudinov T. T.^a, Lecturer, timsx@mail.ru

Lukyanenko I. N.^a, PhD, Tech., Associate Professor, irina.n.lukyanenko@gmail.com

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

Introduction: The available mathematical models of calculating gear vibration take into account possible manufacturing errors in order to improve reliability. However, these models do not take into account the influence of the errors in manufacturing and assembly on the fluctuation of stiffness parameters of the gears. **Purpose:** Our goal is mathematical modeling of spectral characteristics of a gear engagement stiffness which varies depending on the inaccuracies in the gear pitch. **Results:** The mathematical modeling has shown that the stiffness fluctuates not only at the gear frequencies but also at the combination frequencies. Hence, the vibration spectrum will contain not just the harmonics of the perturbing forces but also the combination harmonics of these forces and stiffness fluctuations. **Practical relevance:** The proposed mathematical model allows you to more precisely calculate the vibration of the gears, evaluate the dynamic loads in the contact zones, and much more accurately estimate the operational life and the reliability of a gearbox. At the development stage, it allows you to normalize technological errors of the elements to achieve the desired operational life.

Keywords — Gearing, Stiffness, Modeling, Spectral Characteristics.

References

6. Semenova E. G. *Osnovy modelirovaniia i diagnostiki antennykh ustroystv bortovykh kompleksov* [Fundamentals of Modeling and Diagnostics Antenna Devices Onboard Complexes]. Saint-Petersburg, Politekhnik Publ., 2003. 186 p. (In Russian).
7. Golubkov V. A., Smirnov A. O., Sharafudinov T. T., Lukyanenko I. N. Mathematical Model of Reducer Step Vibration. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2014, no. 6(73), pp. 87–93 (In Russian).
8. Golubkov V. A., Golubkov A. V., Sharafudinov T. T. Vibration Analysis of Slip Teeth Gearing. *Trudy konferentsii "Zavaliшинские chteniia'13"* [Proc. Conf. "Zavaliшинskie Reading'13"]. Saint-Petersburg, GUAP Publ., 2013, pp. 46–48 (In Russian).
9. Golubkov V. A., Golubkov A. V., Sharafudinov T. T. Analysis of the Impact of Slip Processes on Vibration Gearing. *Trudy konferentsii "Zavaliшинские chteniia'14"* [Proc. Conf. "Zavaliшинskie Reading'14"]. Saint-Petersburg, GUAP Publ., 2014, pp. 101–104 (In Russian).
10. Verkovich V. A., Golovenkin E. N., Golubkov V. A., et al. *Spravochnik konstruktora tochnogo priborostroeniia* [Reference Book for Precision Instruments Designer]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1989. 792 p. (In Russian).

**АФНАСЬЕВА
Ирина
Викторовна**



Ведущий инженер Специальной астрофизической обсерватории РАН, Нижний Архыз, аспирант кафедры информационных систем Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики.
В 1991 году окончила Киевский государственный университет им. Т. Г. Шевченко по специальности «Математика».
Является автором шести научных публикаций и одного патента на изобретения.
Область научных интересов — приборы и методы оптической астрономии, программные системы и модели.
Эл. адрес: riv@sao.ru

**ВОСТРИКОВ
Антон
Александрович**



Доцент кафедры вычислительных систем и сетей Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.
В 2000 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения по специальности «Вычислительные машины, комплексы, системы и сети».
В 2004 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук.
Является автором 45 научных публикаций и двух свидетельств о регистрации программного продукта.
Область научных интересов — распределенные и встраиваемые информационно-управляющие системы, обработка визуальной информации, оптико-информационные системы.
Эл. адрес: vostricov@mail.ru

**ДЕРЯБКИН
Игорь
Владимирович**



Старший научный сотрудник кафедры информатики Ростовского государственного университета путей сообщения.
В 2006 году окончил Донской государственный технический университет по специальности «Информационные системы и технологии».
В 2013 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук.
Является автором 40 научных публикаций и пяти патентов на изобретения.
Область научных интересов — оценка параметров динамических систем.
Эл. адрес: i.deryabkin@jint.biz

**БЛАУНШТЕЙН
Натан
Шаевич**



Гражданин Израиля.
Профессор кафедры систем связи инженерного факультета Негевского университета им. Бен-Гуриона, Беэр-Шева, Израиль.
В 1972 году окончил Томский государственный университет по специальности «Радиофизика и электроника, включая квантовую».
В 1991 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора физико-математических наук.
Является автором около 200 научных публикаций, в том числе десяти монографий, шести учебников, пяти патентов и трех изобретений.
Область научных интересов — радиофизика, системы проводной и беспроводной связи, радары, оптика и лидары.
Эл. адрес: nathan.blaunstein@hotmail.com

**ГОЛУБКОВ
Виктор
Александрович**



Доцент, заместитель заведующего кафедрой электротехники и технической диагностики Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.
В 1975 году окончил Ленинградский институт авиационного приборостроения по специальности «Автоматизированные системы управления».
В 1982 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук.
Является автором более 140 научных публикаций и 25 изобретений.
Область научных интересов — теория контроля и диагностики электромеханических систем.
Эл. адрес: viktor-golubkov@yandex.ru

**ИГНАТЬЕВ
Илья
Олегович**



Преподаватель Михайловской военной артиллерийской академии, Санкт-Петербург.
В 1996 году окончил Саратовское высшее военное командно-инженерное Краснознаменное ордена Красной Звезды училище ракетных войск им. Героя Советского Союза генерал-майора А. И. Лизюкова по специальности «Инженер по эксплуатации летательных аппаратов».
Является автором семи научных публикаций.
Область научных интересов — теория вторичной обработки информации.
Эл. адрес: ioi73@mail.ru

**КАРПОВИЧ
Сергей
Николаевич**



Руководитель направления поисковой оптимизации ООО «Рамблер Интернет Холдинг», Москва. В 2006 году окончил Ленинградский электротехнический институт им. В. И. Ульянова (Ленина) по специальности «Автоматизация систем управления». Является автором двух научных публикаций. Область научных интересов — тематическое моделирование, обработка текстов на естественном языке, кластеризация, классификация, машинное обучение. Эл. адрес: cims@yandex.ru

**КОТЕНКО
Игорь
Витальевич**



Профессор, заведующий лабораторией проблем компьютерной безопасности Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН. В 1983 году окончил Военно-космическую академию им. А. Ф. Можайского по специальности «Математическое обеспечение автоматизированных систем управления», в 1987 году — Военную академию связи по специальности «Инженерная автоматизированных систем управления». В 1999 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором более 450 научных публикаций. Область научных интересов — безопасность компьютерных сетей, обнаружение компьютерных атак, межсетевые экраны, защита от вирусов и сетевых червей и др. Эл. адрес: ivkote@comsec.spb.ru

**КУЧИН
Николай
Валентинович**



Доцент кафедры вычислительных систем и сетей Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. В 1975 году окончил Ленинградский институт авиационного приборостроения по специальности «Электронные вычислительные машины». В 1987 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 20 научных публикаций. Область научных интересов — компьютерное моделирование сложных систем, методы организации вычислений в компьютерных сетях. Эл. адрес: nick.kuchin@yandex.ru

**КОСТОГЛОТОВ
Андрей
Александрович**



Профессор кафедры кибербезопасности информационных систем Донского государственного технического университета, Ростов-на-Дону. В 1988 году окончил Ростовское высшее военное командно-инженерное училище ракетных войск им. Главного маршала артиллерии М. И. Неделина по специальности «Радиотехнические средства». В 2007 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором более 250 научных публикаций, в том числе пяти монографий, восьми изобретений и 29 свидетельств на программные продукты. Область научных интересов — решение обратных задач динамики, теория оценивания, структурная и параметрическая идентификация динамических систем. Эл. адрес: kostoglotov@me.com

**КУЗНЕЦОВ
Антон
Александрович**



Доцент, докторант Военно-воздушной академии им. профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина, Воронеж. В 2001 году окончил Ростовский военный институт ракетных войск им. Главного маршала артиллерии М. И. Неделина по специальности «Метрология и метрологическое обеспечение». В 2006 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 60 научных публикаций, в том числе одной монографии, девяти изобретений и восьми свидетельств на программные продукты. Область научных интересов — решение обратных задач динамики, теория оценивания, цифровая обработка радиолокационной информации. Эл. адрес: smithaa@yandex.ru

**ЛАЗАРЕНКО
Сергей
Валерьевич**



Докторант кафедры кибербезопасности и информационных систем Донского государственного технического университета, Ростов-на-Дону. В 2005 году окончил Ростовский военный институт ракетных войск им. Главного маршала артиллерии М. И. Неделина по специальности «Метрология и метрологическое обеспечение». В 2010 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 140 научных публикаций и пяти патентов на изобретения. Область научных интересов — решение обратных измерительных задач, идентификация динамических систем, оптимальное управление. Эл. адрес: rh3311@mail.ru

ЛУКЪЯНЕНКО
Ирина
Николаевна



Доцент кафедры высшей математики и механики Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, почетный работник высшего профессионального образования РФ.

В 1975 году окончила Ленинградский институт авиационного приборостроения по специальности «Авиационное приборостроение».

В 1984 году защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 80 научных публикаций.

Область научных интересов — контроль и диагностика электро-механических систем.

Эл. адрес :
irina.n.lukyanenko@gmail.com

НЕНАШЕВ
Вадим
Александрович



Ассистент кафедры проблемно-ориентированных вычислительных комплексов Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

В 2012 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения по специальности «Информатика и вычислительная техника».

Является автором 20 научных публикаций.

Область научных интересов — компьютерное моделирование, системы навигации и радиолокации, статистический анализ, электродинамика.

Эл. адрес: granat89@mail.ru

НОВИКОВ
Федор
Александрович



Профессор кафедры прикладной математики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета и кафедры компьютерных технологий Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики.

В 1974 году окончил Ленинградский государственный университет по специальности «Математика».

В 2011 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором 75 научных публикаций.

Область научных интересов — прикладная математика, визуальное моделирование программного обеспечения, технологии программирования.

Эл. адрес:
fedornovikov51@gmail.com

НОВОЖИЛОВ
Дмитрий
Александрович



Студент Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ», внешний сотрудник лаборатории проблем компьютерной безопасности Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН.

Является автором трех научных публикаций.

Область научных интересов — защита от информации, категоризация веб-сайтов, Data Mining.

Эл. адрес:
novozhilov@comsec.spb.ru

ОХТИЛЕВ
Михаил
Юрьевич



Профессор, заведующий кафедрой компьютерных технологий и программной инженерии Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

В 1982 году окончил Военный инженерный Краснознаменный институт им. А. Ф. Можайского по специальности «Автоматизированная обработка и анализ информации».

В 2000 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором более 190 научных публикаций, в том числе трех монографий.

Область научных интересов — теория программирования, теория алгоритмов, системы реального времени, математическая логика и др.

Эл. адрес: oxt@mail.ru

ПОПОВА
Елена
Владимировна



Старший преподаватель кафедры информационных систем Смольного института РАО, Санкт-Петербург.

В 1988 году окончила Ленинградский государственный университет им. А. А. Жданова по специальности «Механика. Преподаватель».

Является автором 19 научных публикаций.

Область научных интересов — методы и системы защиты информации, информационная безопасность.

Эл. адрес: sarana5@inbox.ru

ПОПУКАЙЛО
Владимир
Сергеевич



Преподаватель кафедры информационных технологий и автоматизированного управления производственными процессами Инженерно-технического института Приднестровского государственного университета им. Т. Г. Шевченко, республика Молдова.

В 2012 году окончил Приднестровский государственный университет им. Т. Г. Шевченко по специальности «Вычислительные машины, комплексы, системы и сети».

Является автором 14 научных публикаций.

Область научных интересов — математическое моделирование, математическая статистика, теория принятия решений.

Эл. адрес: vsp.science@gmail.com

СЕРГЕЕВ
Александр
Михайлович



Старший преподаватель кафедры вычислительных систем и сетей Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. В 2004 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения по специальности «Вычислительные машины, комплексы, системы и сети».

Является автором 32 научных публикаций.

Область научных интересов — численные методы, теория вычислительных процессов, проектирование специализированных процессоров.

Эл. адрес: asklab@mail.ru

СОЛОВЬЕВ
Николай
Владимирович



Доцент кафедры вычислительных систем и сетей Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, почетный работник высшего профессионального образования РФ.

В 1979 году окончил Ленинградский политехнический институт по специальности «Автоматизация и комплексная механизация машиностроения».

В 2004 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 40 научных публикаций и четырех патентов на изобретения.

Область научных интересов — распознавание образов, компьютерная обработка и анализ изображений, техническое зрение роботов.

Эл. адрес: famsol@yandex.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 24 научных публикаций.

Область научных интересов — техническая диагностика, теория динамических систем, теория автоматического управления, компьютерное моделирование.

Эл. адрес: al2tn@yandex.ru

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

УЛЬЯНОВ
Геннадий
Николаевич



Профессор Михайловской военной артиллерийской академии, Санкт-Петербург, заслуженный деятель науки и техники РФ, академик Академии военных наук, член-корреспондент Санкт-Петербургской инженерной академии.

В 1964 году окончил Военную артиллерийскую академию по специальности «Радиотехнические средства управления и разведки РВ и А».

В 1989 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором более 120 научных публикаций и 15 авторских свидетельств и патентов на изобретения.

Область научных интересов — теория вторичной обработки информации.

Эл. адрес: gulianov@ya.ru

ЦАРЕВ
Игорь
Владимирович



Ведущий программист Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН.

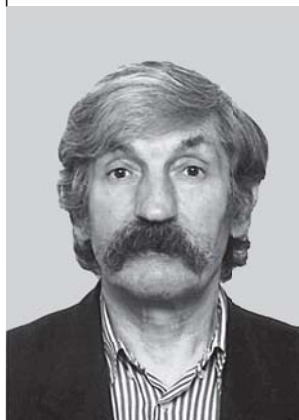
В 1970 году окончил Ленинградский электротехнический институт им. В. И. Ульянова (Ленина) по специальности «Электронные вычислительные машины».

Является автором более 40 научных публикаций.

Область научных интересов — системное программирование, языки программирования, трансляторы, параллельное программирование, операционные системы.

Эл. адрес: civ@iias.spb.su

ЧЕРЕНОК
Николай
Гаврилович



Доцент Михайловской военной артиллерийской академии, Санкт-Петербург.

В 1977 году окончил Военную инженерную радиотехническую академию ПВО по специальности «Радиотехническая».

В 1983 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Является автором более 80 научных публикаций.

Область научных интересов — теория вторичной обработки информации.

Эл. адрес: ncherenok@ya.ru

ЧЕЧУЛИН
Андрей
Алексеевич



Старший научный сотрудник лаборатории проблем компьютерной безопасности Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН.

В 2005 году окончил магистратуру Санкт-Петербургского государственного политехнического университета по специальности «Безопасность и защита информации».

В 2013 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Является автором более 150 научных публикаций.

Область научных интересов — безопасность компьютерных сетей, обнаружение вторжений, анализ сетевого трафика, анализ уязвимостей, интеллектуальный анализ данных.

Эл. адрес: chechulin@comsec.spb.ru

ШАРАФУДИНОВ
Темиргазиз
Талибуллоевич



Старший преподаватель кафедры радиотехнических и оптоэлектронных комплексов Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

В 1984 году окончил Ленинградский институт авиационного приборостроения по специальности «Радиотехника».

Является автором 34 научных публикаций и 15 патентов на изобретения.

Область научных интересов — виброакустическая диагностика, методы моделирования вибрационных сигналов для систем контроля, квантовые приборы и их применение в качестве датчиков для измерения виброакустических полей, оптоэлектронные приборы и системы.

Эл. адрес: timsx@mail.ru

ШИЛОВ
Николай
Германович



Доцент, старший научный сотрудник лаборатории интегрированных систем автоматизации Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН.

В 1998 году окончил с отличием Санкт-Петербургский государственный технический университет по специальности «Экономика и управление на машиностроительных предприятиях».

В 2004 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Является автором более 150 научных публикаций.

Область научных интересов — управление знаниями, конфигурирование, профилирование, управление онтологиями, управление контекстом, проактивные рекомендуемые системы.

Эл. адрес: nick@iias.spb.su

ШИШЛАКОВ
Владислав
Федорович



Профессор, заведующий кафедрой управления и информатики в технических системах Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

В 1982 году окончил Ленинградский институт авиационного приборостроения по специальности «Электрооборудование летательных аппаратов».

В 2002 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.

Является автором более 100 научных и учебно-методических публикаций, в том числе трех монографий.

Область научных интересов — синтез нелинейных систем автоматического управления с различными видами модуляции сигнала.

Эл. адрес: kaf_32@aanet.ru

**ШМЕЛЕВ
Валентин
Валерьевич**



Докторант кафедры технологий и средств комплексной обработки и передачи информации в АСУ Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург.

В 2000 году окончил Военно-космическую академию им. А. Ф. Можайского по специальности «Бортовые радиоэлектронные системы космических аппаратов».

В 2006 г. защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 50 научных публикаций.

Область научных интересов — автоматизированная обработка измерительной информации космических средств, контроль и диагностирование технического состояния, экспертные системы.

Эл. адрес:

valja1978@yandex.ru

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.

СОДЕРЖАНИЕ ЖУРНАЛА «ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ» ЗА 2016 г. [№ 1–6]

	№	Стр.
Balonin N. A., Jennifer Seberry. Cretan ($4t + 1$) Matrices	4	2
Lyandres Vladimir. Heuristics of Channel Allocation in Radio Networks	3	47
Абрамов А. Ю., Востокова Е. С. Шифрование при помощи спаривания	3	79
Абрамов М. В., Азаров А. А., Тулупьева Т. В., Тулупьев А. Л. Модель профиля компетенций злоумышленника в задаче анализа защищённости персонала информационных систем от социоинженерных атак	4	77
Афанасьева И. В., Новиков Ф. А. Архитектура программного обеспечения систем оптической регистрации	3	51
Балонин Н. А., Сергеев М. Б. Матрицы Мерсенна и Адамара, произведения	5	2
Балонин Н. А., Сергеев М. Б. Матрицы Мерсенна и Адамара	1	2
Балонин Н. А., Сергеев М. Б. Матрицы Пропус 92 и 116	2	101
Балонин Н. А., Сергеев М. Б., Суздаль В. С. Матричные модели обобщенной кристаллографии	4	26
Балонин Н. А., Сергеев М. Б., Суздаль В. С. Фinitные модели динамики в спорте	3	34
Барковский Е. А., Соколов А. В. Модель управления двумя параллельными FIFO-очередями, двигающимися друг за другом в общей памяти	1	65
Басов О. О., Кипяткова И. С., Савельев А. И., Сайтов И. А. Модели кодирования полимодальной информации	2	68
Белим С. В., Богаченко Н. Ф., Ракицкий Ю. С. Совмещение политик безопасности, основанное на алгоритмах поддержки принятия решений	5	66
Богачев И. В., Левенец А. В., Чье Ен Ун. Применение искусственной нейронной сети для классификации телеметрических данных в системах сжатия	3	2
Бритов Г. С. Анализ процесса диагностирования динамических систем по OSTN-диаграммам IDEF3-технологии	1	93
Бураков М. В., Коновалов А. С. Нечеткое управление автомобильной антиблокировочной системой	2	35
Буряченко В. В., Фаворская М. Н., Томилина А. И. Применение нечеткого эволюционного классификатора Такаги — Сугено для задач обнаружения и сопровождения объектов на видеопоследовательности	5	15
Востриков А. А., Кучин Н. В., Петренко Е. А., Сергеев А. М., Соловьев Н. В., Соловьева Т. Н. Улучшение различимости информативных фрагментов монохромных ИК-изображений	6	2
Голубков В. А., Шишлаков В. Ф., Шарафудинов Т. Т., Лукьяненко И. Н. Моделирование спектральных характеристик жесткости зубчатого зацепления	6	99
Гордеев А. В. Вопросы терминологии. Как правильно: права и/или разрешения?	1	110
Дойникова Е. В., Котенко И. В. Методики и программный компонент оценки рисков на основе графов атак для систем управления информацией и событиями безопасности	5	54
Егоров И. В., Мелехин В. Ф. Анализ проблемы повышения радиационной стойкости информационно-управляющих систем на этапе функционально-логического проектирования	1	26
Егоров И. В., Мелехин В. Ф. Анализ процессов в конечном автомате при воздействии радиации. Оценка вероятности искажения информации	3	24

	№	Стр.
Егоров И. В., Мелехин В. Ф. Методы и средства анализа надежности структурных блоков с резервированием и периодическим восстановлением информации на различных этапах проектирования вычислительных систем	2	26
Елтышев Д. К. Интеллектуальные модели комплексной оценки технического состояния высоковольтных выключателей	5	45
Жирнов А. А., Титов С. С., Кудряшова О. Б. Модификация турбидиметрического высокоселективного метода для измерения быстропротекающих процессов	3	95
Зиатдинов С. И. Анализ линейных систем на основе переходных характеристик	2	104
Зиатдинов С. И. Синтез нерекурсивных дискретных фильтров во временной области	5	98
Каплин А. Ю., Степанов М. Г. Анализ алгоритма комплексной обработки угломерной информации в навигационной системе подвижного объекта	2	89
Карпович С. Н. Тематическая модель с бесконечным словарем	6	43
Кашевник А. М., Баранюк О. А., Гордеев Б. Р. Система управления компетенциями резидентов технопарков	4	10
Костоглотов А. А., Кузнецов А. А., Лазаренко С. В., Дерябкин И. В. Метод структурной адаптации дискретных алгоритмов объединенного принципа максимума в задачах оценки параметров движения	6	10
Красильников Н. Н., Красильникова О. И. Исследование критического значения экранного параллакса	2	19
Крук Е. А., Овчинников А. А. Точная корректирующая способность кодов Гилберта при исправлении пакетов ошибок	1	80
Кударов Р. С., Сутугинене Ю. Анализ достоверности тестовой формы контроля знаний	1	102
Кулаков С. В., Бальшева О. Л., Клуздин В. В. Методы акустооптики в исследовании свойств материалов для акустооптических и акустоэлектронных устройств	2	84
Куликов Г. Г., Антонов В. В., Шилина М. А., Фахруллина А. Р. Структурирование контента предметной области для дальнейшего интеллектуального анализа. Пример формирования структурированного контента учебно-производственной деятельности	2	95
Кульминский Д. Д., Пономаренко В. И., Прохоров М. Д., Безручко Б. П. Система передачи информации, основанная на обобщенной хаотической синхронизации	2	42
Кутузов О. И., Татарникова Т. М. К оцениванию и сопоставлению очередей классических и фрактальных систем массового обслуживания	2	48
Кучерявый Е. А., Ярцев С. В. Теория эпидемий как инструмент анализа распространения широковещательного трафика в сетях VANET	4	101
Кучмин А. Ю. Об одном методе нелинейного программирования с произвольными ограничениями	2	2
Ложников П. С., Сулавко А. Е., Еременко А. В., Волков Д. А. Экспериментальная оценка надежности верификации подписи сетями квадратичных форм, нечеткими экстракторами и перцептронами	5	73
Мальцев Г. Н., Назаров А. В., Якимов В. Л. Имитационное моделирование процесса диагностирования сложной технической системы с высоким уровнем автономности функционирования	4	34
Мальцев Г. Н., Козин И. А. Передача гиперспектральных видеоданных дистанционного зондирования Земли по радиоканалам с ограниченной пропускной способностью	2	74
Мальцев Г. Н., Склемин Д. В. Анализ готовности сложных технических систем при использовании информационных технологий поддержки жизненного цикла	3	38
Маркелов В. В., Костишин М. О., Жаринов И. О., Нечаев В. А. Реализация построения маршрутных траекторий для отображения на бортовых многофункциональных индикаторах	1	40

	№	Стр.
Мартынова Л. А., Розенгауз М. Б. К вопросу о надежности автономного необитаемого подводного аппарата с мультиагентной архитектурой системы управления	5	25
Мичурин С. В., Ивакин Я. А. Результативность и качество программных комплексов ситуационного управления для автоматизированных систем диспетчеризации пространственных процессов авиатранспорта	4	19
Назаров А. А., Бронер В. И. Исследование потоковых моделей управления запасами методом R-аппроксимации	5	91
Ненашев В. А., Блаунштейн Н. Ш. Моделирование процесса распространения радиоволн в канале «земля-атмосфера»	6	25
Новиков П. А., Хомоненко А. Д., Яковлев Е. Л. Комплекс программ для навигации мобильных устройств внутри помещений с помощью нейронных сетей	1	32
Новиков Ф. А., Афанасьева И. В. Кооперативное взаимодействие автоматных объектов	6	50
Новожилов Д. А., Чечулин А. А., Котенко И. В. Улучшение категорирования веб-сайтов для блокировки неприемлемого содержимого на основе анализа статистики HTML-тэгов	6	65
Павлов В. С. Пространственно-частотный метод определения угловых координат локационного объекта	4	94
Попова Е. В. Метод выбора системы защиты информации с учетом критерия конкурентоспособности предприятия	6	85
Попукайло В. С. Исследование линейной корреляционной связи в многомерном методе точечных распределений	6	96
Проскурин А. В., Фаворская М. Н. Автоматическое аннотирование изображений на основе однородных текстово-визуальных групп	2	11
Пятаева А. В., Фаворская М. Н. Модель фона при детектировании дыма по видеопоследовательностям на открытых пространствах	4	44
Савельев А. И. Алгоритмы обработки данных в контролируемых аккаунтах системы видеоконференцсвязи	3	15
Сергеев А. М., Мишура О. В. О сходимости и устойчивости разрядного метода решения систем линейных алгебраических уравнений	3	100
Солёный С. В., Солёная О. Я. Анализ математических методов оценки безопасности электрифицированных помещений	1	58
Соловьева Т. Н., Переварюха А. Ю. Динамическая модель деградации запасов осетровых рыб со сложной внутривидовой структурой	4	60
Томчук К. К. Применение частотного маскирования при MFCC-параметризации речи на фоне шумов	3	8
Торгашев В. А., Царев И. В. Реализация суперкомпьютеров с динамической архитектурой на современной элементной базе	6	74
Трегубов Р. Б., Орешин А. Н. Модель источника трафика с изменяющейся скоростью передачи	4	51
Трофимов А. Н., Таубин Ф. А. Теоретико-информационный анализ многоуровневой flash-памяти. Часть 2. Оценка параметров кодов, обеспечивающих заданную надежность хранения данных	3	64
Трофимов А. Н., Таубин Ф. А. Теоретико-информационный анализ многоуровневой flash-памяти. Часть 1. Модель канала и границы случайного кодирования	2	56
Ульянов Г. Н., Черенок Н. Г., Игнатъев И. О. Организация информационного обмена навигационных постов и объекта навигации в активно-пассивной системе	6	91
Фаворская М. Н., Пятаева А. В. Детектирование дыма на открытых пространствах в сложных погодных условиях с применением пространственно-временных локальных бинарных шаблонов	1	16

	№	Стр.
Хименко В. И. Вероятностная структура фазовых траекторий случайных процессов	3	85
Хименко В. И. Диаграммы рассеяния в анализе случайных потоков событий	4	85
Чепруков Ю. В., Соколов М. А. Квазидополнительные бинарные кодовые последовательности	3	72
Чижев А. А. Сверхразрешение радиолокационных целей при воздействии активных шумовых помех по основному и ближним боковым лепесткам диаграммы направленности антенны РЛС	1	88
Шведенко В. Н., Щекочихин О. В., Шведенко П. В. Вариант архитектуры управляющей информационной системы для разрешения проблемных ситуаций на предприятии	5	86
Шилов Н. Г. Методология построения проактивных рекомендуемых систем для инфомобильных приложений	6	16
Шмелев В. В., Охтилев М. Ю. Система показателей качества моделей технологических процессов функционирования ракетно-космической техники	6	34
Шмелев В. В., Охтилев М. Ю. Сравнительный анализ структурно-логического подхода к моделированию технологических процессов функционирования ракетно-космической техники	5	35
Шпаков В. М. Компьютерная реализация процессов на основе их логико-динамической спецификации	4	68
Штанько С. В., Лесняк Д. А. Обеспечение селективного доступа при широкополосной передаче информации	1	74
Юрыгина Ю. С., Скорюпина Е. Г., Лахин О. И., Мишурова Н. В. Подход к разработке системы распознавания и предупреждения нештатных ситуаций транспортного грузового корабля «Прогресс» на основе мультиагентных технологий и онтологий	1	50
Сведения об авторах	1	114
Сведения об авторах	2	107
Сведения об авторах	3	105
Сведения об авторах	4	108
Сведения об авторах	5	102
Сведения об авторах	6	103

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 заверстываются и предоставляются отдельными исходными файлами, поддающимися редактированию:

- рисунки, графики, диаграммы, блок-схемы предоставляйте в виде отдельных исходных файлов, поддающихся редактированию, используйте 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 подписанных 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 — СИБИБД 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: i-us.spb@gmail.com

Сайт: www.i-us.ru

ISSN 1684-8853



9 771684 885009