

SPIIRAS PROCEEDINGS

Issue № 4(53), 2017

Scientific, educational, and interdisciplinary journal primarily specialized
in computer science, automation, and applied mathematics

Trudy SPIIRAN ♦ Founded in 2002 ♦ Труды СПИИРАН

Founder and Publisher

St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences

Editor-in-Chief

R. M. Yusupov, Prof., Dr. Sci., Corr. Member of RAS, St. Petersburg, Russia

Editorial Board Members

A. A. Ashimov ,	Prof., Dr. Sci., Academician of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Almaty, Kazakhstan
S. N. Baranov ,	Prof., Dr. Sci., St. Petersburg, Russia
N. P. Veselkin ,	Prof., Dr. Sci., Academician of RAS, St. Petersburg, Russia
V. I. Gorodetski ,	Prof., Dr. Sci., St. Petersburg, Russia
O. Yu. Gusikhin ,	Ph. D., Dearborn, USA
V. Delic ,	Prof., Dr. Sci., Novi Sad, Serbia
A. Dolgui ,	Prof., Dr. Habil., St. Etienne, France
M. Zelezny ,	Assoc. Prof., Ph.D., Plzen, Czech Republic
I. A. Kalyaev ,	Prof., Dr. Sci., Academician of RAS, Taganrog, Russia
D. A. Ivanov ,	Prof., Dr. Habil., Berlin, Germany
G. A. Leonov ,	Prof., Dr. Sci., Corr. Member of RAS, St. Petersburg, Russia
K. P. Markov ,	Assoc. Prof., Ph.D., Aizu, Japan
Yu. A. Merkurjev ,	Prof., Dr. Habil., Academician of the Latvian Academy of Sciences, Riga, Latvia
R. V. Meshcheryakov ,	Prof., Dr. Sci., Tomsk, Russia
N. A. Moldovian ,	Prof., Dr. Sci., St. Petersburg, Russia
V. E. Pavlovskiy ,	Prof., Dr. Sci., Moscow, Russia
A. A. Petrovsky ,	Prof., Dr. Sci., Minsk, Belarus
V. A. Putilov ,	Prof., Dr. Sci., Apatity, Russia
V. K. Pshikhopov ,	Prof., Dr. Sci., Taganrog, Russia
A. L. Ronzhin	(Deputy Editor-in-Chief), Prof., Dr. Sci., St. Petersburg, Russia
A. I. Rudskoi ,	Prof., Dr. Sci., Academician of RAS, St. Petersburg, Russia
V. Sgurev ,	Prof., Dr. Sci., Academician of the Bulgarian academy of sciences, Sofia, Bulgaria
V. Skormin ,	Prof., Ph.D., Binghamton, USA
A. V. Smirnov ,	Prof., Dr. Sci., St. Petersburg, Russia
B. Ya. Sovetov ,	Prof., Dr. Sci., Academician of RAE, St. Petersburg, Russia
V. A. Soyfer ,	Prof., Dr. Sci., Academician of RAS, Samara, Russia
B. V. Sokolov ,	Prof., Dr. Sci., St. Petersburg, Russia
L. V. Utkin ,	Prof., Dr. Sci., St. Petersburg, Russia
A. L. Fradkov ,	Prof., Dr. Sci., St. Petersburg, Russia
L. B. Sheremetov ,	Assoc. Prof., Dr. Sci., Mexico, Mexico

Editor: E. P. Miroshnikova

Technical editor: A. I. Motienko

Translator: P. N. Emeleva

Editorial Board's address

14-th line VO, 39, SPIIRAS, St. Petersburg, 199178, Russia,
e-mail: publ@iias.spb.su, web: <http://www.proceedings.spiiras.nw.ru/>

The journal is indexed in Scopus

© St. Petersburg Institute for Informatics and Automation
of the Russian Academy of Sciences, 2017

ТРУДЫ СПИИРАН

Выпуск № 4(53), 2017

Научный, научно-образовательный, междисциплинарный журнал с базовой специализацией в области информатики, автоматизации и прикладной математики
Журнал основан в 2002 году

Учредитель и издатель

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук
(СПИИРАН)

Главный редактор

Р. М. Юсупов, чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, проф., С-Петербург, РФ

Редакционная коллегия

- А. А. Ашимов**, академик национальной академии наук Республики Казахстан д-р техн. наук, проф., Алматы, Казахстан
С. Н. Баранов, д-р физ.-мат. наук, проф., С.-Петербург, РФ
Н. П. Веселкин, академик РАН, д-р мед. наук, проф., С.-Петербург, РФ
В. И. Городецкий, д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
О. Ю. Гусихин, Ph.D., Диаборн, США
В. Делич, д-р техн. наук, проф., Нови-Сад, Сербия
А. Б. Долгий, Dr. Habil., проф., Сент-Этьен, Франция
М. Железны, Ph.D., доцент, Пльзень, Чешская республика
Д. А. Иванов, д-р экон. наук, проф., Берлин, Германия
И. А. Каляев, академик РАН, д-р техн. наук, профессор, Таганрог, РФ
Г. А. Леонов, член-корр. РАН, д-р физ.-мат. наук, проф., С.-Петербург, РФ
К. П. Марков, Ph.D., доцент, Аизу, Япония
Ю. А. Меркурьев, академик Латвийской академии наук, Dr. Habil., проф., Рига, Латвия
Р. В. Мещеряков, д-р техн. наук, профессор, Томск, РФ
Н. А. Молдовян, д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
В. Е. Павловский, д-р физ.-мат. наук, профессор, Москва, РФ
А. А. Петровский, д-р техн. наук, проф., Минск, Беларусь
В. А. Путилов, д-р техн. наук, проф., Апатиты, РФ
В. Х. Пшихопов, д-р техн. наук, профессор, Таганрог, РФ
А. Л. Ронжин (зам. главного редактора), д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
А. И. Рудской, академик РАН, д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
В. Сгурев, академик Болгарской академии наук, д-р техн. наук, проф., София, Болгария
В. А. Скормин, Ph.D., проф., Бингемптон, США
А. В. Смирнов, д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
Б. Я. Советов, академик РАН, д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
В. А. Сойфер, академик РАН, д-р техн. наук, проф., Самара, РФ
Б. В. Соколов, д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
Л. В. Уткин, д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
А. Л. Фрадков, д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
Л. Б. Шереметов, д-р техн. наук, Мехико, Мексика

Редактор: Е. П. Мирошникова

Технический редактор: А. И. Мотиечко

Переводчик: П. Н. Емелева

Адрес редакции

199178, Санкт-Петербург, 14-я линия, д. 39,
e-mail: publ@iias.spb.su, сайт: <http://www.proceedings.spiiras.nw.ru/>

Журнал индексируется в международной базе данных Scopus

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»

© Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук, 2017
Разрешается воспроизведение в прессе, а также сообщение в эфир или по кабелю опубликованных в составе печатного периодического издания–журнала «Труды СПИИРАН» статей по текущим экономическим, политическим, социальным и религиозным вопросам с обязательным указанием имени автора статьи и печатного периодического издания–журнала «Труды СПИИРАН»

CONTENTS

Theoretical and Applied Mathematics

Batenkov K.A.
NUMERIC FEATURES OF NETWORKING 5

Kovalenko A.Y.
MATHEMATICAL ASPECTS OF EVALUATING EFFECTIVENESS OF THE EARTH'S SURFACE SPACECRAFT 29

Bubnov V.P., Eremin A.S., Kovrizhnykh N.A., Olemskoy I.V.
COMPARATIVE STUDY OF THE ADVANTAGES OF STRUCTURAL NUMERICAL INTEGRATION METHODS FOR ORDINARY DIFFERENTIAL EQUATIONS 51

Abdullin A.A., Drozdov V.N., Mamatov A.G.
INFLUENCE OF TRANSFER FUNCTION ZEROS ON CONTROLLER PARAMETERS 73

Information Security

Osipov V.Yu, Vorobiev. V.I., Levonevskiy D.K.
PROBLEMS OF PROTECTION AGAINST FALSE INFORMATION IN COMPUTER NETWORKS 97

Methods of Information Processing and Management

Astafurov V.G., Skorokhodov A.V.
FORMATION OF A SET OF INFORMATIVE CLASSIFICATION FEATURES FOR SOLVING CLOUD CLASSIFICATION PROBLEM USING MODIS SATELLITE DATA 118

Biryukov D.N., Lomako A.G., Sabirov T.R.
ABDUCTIVE SYNTHESIS OF THE STRUCTURES OF THE FUNCTIONAL TYPES OF SCENARIOS TO ESTABLISH THE MULTI-MODEL ANALOGIES IN CONCEPTUAL AND ONTOLOGICAL KNOWLEDGE 140

Parshutkin A.V., Maslakov P.A.
STUDY OF THE NOISE IMMUNITY OF MODERN STANDARDS OF SATELLITE COMMUNICATIONS TO THE IMPACT OF NON-STATIONARY INTERFERENCE 159

Shushlyapin E.A., Karapetyan V.A., Bezuglaya A.E., Afonina A.A.
AN ALGORITHM FOR BUILDING DEFORMABLE 3D HUMAN FACE MODELS AND JUSTIFICATION OF ITS APPLICABILITY FOR RECOGNITION SYSTEMS 178

Algorithms and Software

Kulakov K.A., Zavyalova Yu.V., Shabalina I.M.
SOCIAL NAVIGATOR: IMPLEMENTATION OF THE SOFTWARE INFRASTRUCTURE OF ROUTE PLANNING FOR PEOPLE WITH DISABILITIES 201

Mironov V.V., Gusarenko A.S., Yusupova N.I.
STRUCTURING VIRTUAL MULTI-DOCUMENTS IN SITUATIONALLY-ORIENTED DATABASES BY MEANS OF ENTRY-ELEMENTS 225

СОДЕРЖАНИЕ

Теоретическая и прикладная математика

Батенков К.А. ЧИСЛОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТРУКТУР СЕТЕЙ СВЯЗИ	5
Коваленко А.Ю. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОЦЕНИВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ	29
Бубнов В.П., Еремин А.С., Коврижных Н.А., Олемской И.В. СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕИМУЩЕСТВ СТРУКТУРНЫХ МЕТОДОВ ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ ОБЫКНОВЕННЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ	51
Абдуллин А.А., Дроздов В.Н, Маматов А.Г. ВЛИЯНИЕ НУЛЕЙ ПЕРЕДАТОЧНОЙ ФУНКЦИИ ОБЪЕКТА НА СВОЙСТВА РЕГУЛЯТОРА	73

Информационная безопасность

Осипов В.Ю., Воробьев В.И., Левоневский Д.К. ПРОБЛЕМЫ ЗАЩИТЫ ОТ ЛОЖНОЙ ИНФОРМАЦИИ В КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЯХ	97
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

Методы управления и обработки информации

Астафуров В.Г., Скороходов А.В. ФОРМИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ИНФОРМАТИВНЫХ КЛАССИФИКАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ КЛАССИФИКАЦИИ ОБЛАЧНОСТИ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ MODIS	118
Бирюков Д.Н., Ломако А.Г., Сабиров Т.Р. АБДУКТИВНЫЙ СИНТЕЗ СТРУКТУР ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ТИПОВ СЦЕНАРИЕВ ДЛЯ УСТАНОВЛЕНИЯ АНАЛОГИЙ В МНОГОМОДЕЛЬНОЙ КОНЦЕПТУАЛЬНО- ОНТОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ ЗНАНИЙ	140
Паршуткин А.В., Маслаков П.А. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ СОВРЕМЕННЫХ СТАНДАРТОВ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ К ВОЗДЕЙСТВИЮ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПОМЕХ	159
Шушляпин Е.А., Карапетьян В.А., Безуглая А.Е., Афонина А.А. НЕЛИНЕЙНЫЕ РЕГУЛЯТОРЫ ДЛЯ УДЕРЖАНИЯ СУДНА НА ЗАДАННОЙ ТРАЕКТОРИИ ПРИ «СИЛЬНЫХ» МАНЕВРАХ	178

Алгоритмы и программные средства

Кулаков К.А., Завьялова Ю.В., Шабалина И.М. СОЦИАЛЬНЫЙ НАВИГАТОР: РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОГРАММНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ПЛАНИРОВАНИЯ МАРШРУТОВ ДЛЯ ЛЮДЕЙ С ОГРАНИЧЕННЫМИ ВОЗМОЖНОСТЯМИ	201
Миронов В.В., Гусаренко А.С., Юсупова Н.И. СТРУКТУРИРОВАНИЕ ВИРТУАЛЬНЫХ МУЛЬТИДОКУМЕНТОВ В СИТУАЦИОННО- ОРИЕНТИРОВАННЫХ БАЗАХ ДАННЫХ С ПОМОЩЬЮ ENTRY-ЭЛЕМЕНТОВ	225

К. А. БАТЕНКОВ

ЧИСЛОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТРУКТУР СЕТЕЙ СВЯЗИ*Батенков К.А. Числовые характеристики структур сетей связи.*

Аннотация. При решении задач, связанных с анализом и синтезом сетей связи по показателям устойчивости, особое место занимают вопросы описания структур сетей связи с позиций теории графов. При этом традиционным является подход, подразумевающий формальное представление телекоммуникационной сети как неориентированного графа. В данной работе рассматриваются возможные варианты представления графов не в форме их диаграмм (рисунков в двумерной плоскости), а на основе различного набора чисел, либо же вообще одного числа. Подобное описание в ряде случаев позволяет существенно упростить процедуры, связанные с вычислением показателей не только устойчивости исходной сети, но иногда и других показателей качества. При этом появляется возможность алгоритмического решения задач синтеза структур телекоммуникационных сетей, а не только переборными визуальными методами. Приведены примеры расчетов характеристик структур сетей связи для простейших вариантов. Кроме того, в работе не только описан аналитический аппарат формирования числовых описаний структур сетей, но и представлены соотношения, выполняющие трансформацию подобных описаний друг в друга.

Ключевые слова: сеть связи, граф, структура, инвариант, матрица смежностей, матрица инцидентий, мини-код, макси-код.

1. Введение. При решении задач, связанных с анализом и синтезом сетей связи по показателям устойчивости [1, 2], особое место занимают вопросы описания структур сетей связи с позиций теории графов [3, 4]. При этом традиционным является подход [5, 6], подразумевающий формальное представление телекоммуникационной сети как неориентированного графа (множество точек или вершин и множество линий или ребер, соединяющих между собой все или часть этих точек [7, 8]).

Структура сети задается в общем случае взвешенным графом $G = \{D, \Phi, P\}$ [2], где $D = \{d_i\}$ — множество элементов графа такое, что $D = V \cup L$, где, в свою очередь, $V = \{v_i\}$ и $L = \{l_{i,j}\}$ — множества вершин и ребер графа такие, что $V \cap L = \emptyset$ (здесь \cup и \cap — символы объединения и пересечения соответственно, а \emptyset — пустое множество); очевидно, что вершина графа есть узел связи на сети, а ребро — линия связи; $\Phi(l_{i,j}) = v_i \& v_j$ — отображение инцидентии и смежности элементов графа; если вершина v_i соединена с v_j ребром $l_{i,j}$, то говорят, что ребро $l_{i,j}$ инцидентно

вершинам v_i и v_j , а последние, в свою очередь, смежны по ребру $l_{i,j}$, при этом v_i и v_j являются вершинами граничной пары ребра $l_{i,j}$, $P = \{p(d_i)\} = \{p_i\}$ — множество статистически независимых вероятностей исправного состояния элементов графа. Следует также отметить, что при описании неориентированного ребра порядок следования индексов вершин его граничной пары безразличен. Тем не менее обычно вначале пишется меньший номер вершины, а затем больший.

В отличие от наиболее часто используемого подхода — представления графов в форме диаграмм (рисунков в двумерной плоскости), данная работа посвящена вариантам отображения графов на основе наборов чисел (векторов, матриц, скаляров или инвариантов). В результате появляется возможность значительного упрощения расчетов как показателей устойчивости сетей, так и ряда других параметров, зависящих от их структур сетей связи. Кроме того, синтез телекоммуникационных сетей, традиционно выполняемый на основе переборных методов, может быть сведен к задаче последовательной оптимизации.

2. Основные понятия теории графов. Два графа G и H являются изоморфными (обозначается как $G \cong H$ или иногда $G = H$), если между их множествами вершин наблюдается взаимно однозначное сохраняющее смежность соответствие. Например, графы G_1 и G_2 на рисунке 1 изоморфны, а граф G_3 изоморфен каждому из них. Очевидно, что изоморфизм — это отношение эквивалентности на графах.

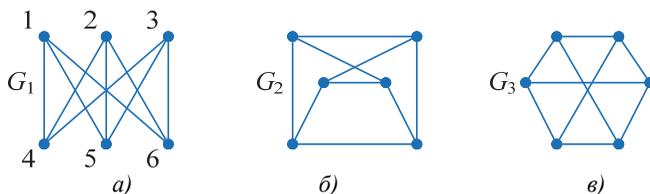


Рис. 1. Графы: а) помеченный, б, в) непомеченные

Инвариант графа G — это число, взаимосвязанное с графом G , принимающее одинаковые значения для любого графа, изоморфного графу G . Так, количество вершин v и ребер l — это инварианты. С точностью до изоморфизма граф задается полным набором инвариантов. Так, для всех графов с количеством вершин, не

превышающем трех, числа v и l формируют полный набор инвариантов. На данный момент неизвестно ни одной нетривиальной полной системы инвариантов для графов.

Структура графа помимо ее типа характеризуется такими показателями, как мощность его множеств и степень вершин.

Мощность множества — число элементов, входящих в данное множество. В графе различают множества элементов D , V и L , поэтому мощности этих множеств обозначают следующим образом: $d = |D|$, $v = |V|$ и $l = |L|$, при этом всегда $d = v + l$.

Степень вершины v_i — число инцидентных ей ребер. Заметим, что сама вершина и число инцидентных ей ребер обозначается одним и тем же символом. В дальнейшем, в случае неоднозначности, будет конкретно указываться, что имеется в виду. Иногда степень вершины также называется валентностью [10]. В структуре графа мощности множеств и степени вершин взаимосвязаны. Действительно, например, мощность множества ребер можно вычислить по формуле:

$$l = \sum_{i=1}^{v-1} \sum_{\substack{j=1 \\ l_{i,j} \in L}}^{v_i} a_j, a_j = \begin{cases} 1, & i < j, \\ 0, & i \geq j. \end{cases}$$

Кроме того, справедлива теорема 1 (Эйлера) (первая в истории теории графов [11]): удвоенное количество ребер графа равно сумме степеней его вершин:

$$\sum_{i=1}^n v_i = 2l. \tag{1}$$

В (v, l) -графе $0 \leq v_i \leq l - 1$ для произвольной вершины v_i . Используются следующие обозначения: минимальная степень вершин графа G — $\mindeg G = v_{\min}(G)$, максимальная — $\maxdeg G = v_{\max}(G)$. Если $v_{\min}(G) = v_{\max}(G) = r$, то степень всех вершин одинаковы и такой граф G называют регулярным (или однородным) степени r . В данном контексте используют понятие степени графа и обозначают $\deg G = r$.

Регулярный граф степени 0 не имеет ребер, и все его вершины изолированы. У регулярного графа G степени 1 каждая его компонента включает лишь одно ребро; у регулярного графа степени

2 — цикл и, естественно, наоборот. Однородный граф степени $v-1$ является v -кликкой. Вершину со степенью $v_i = 0$ называют изолированной, а со степенью $v_i = 1$ — концевой (или висячей).

3. Вектор степеней и его обращение. Пусть v_1, v_2, \dots, v_v — степени вершин графа G , выписанные в порядке неубывания: $v_1 \leq v_2 \leq \dots \leq v_v$. Упорядоченную систему $[v_1 \ v_2 \ \dots \ v_v]^T$ называют *вектором степеней* графа v_1, v_2, \dots, v_v и кратко обозначают $v(G) = [v_1 \ v_2 \ \dots \ v_v]^T$ [12], где T — оператор транспонирования. Вместо вектора степеней часто пользуются его обращением $v'(G) = [v'_1 \ v'_2 \ \dots \ v'_v]^T$, где $v'_i = v_{n-i}$, $i = 1, \dots, v$ — те же степени вершин, но упорядоченные в порядке невозрастания $v'_1 \geq v'_2 \geq \dots \geq v'_v$. Здесь и далее для общности обозначений будем подразумевать, что все векторы являются вектор-столбцами.

Задача 1. Диаграммы графов изображены на рисунке 2 (каждая вершина обозначена ее степенью). Определить векторы степеней и их обращения.

Дано: G_1, G_2 .

Найти: $v(G_1), v(G_2), v'(G_1), v'(G_2)$.

Для графа, изображенного слева на рисунке 2, упорядочим вершины в порядке невозрастания их степеней. Тогда $v(G_1) = [1 \ 2 \ 2 \ 2 \ 2 \ 3]^T$. Упорядочив вершины в порядке их неубывания, получаем $v'(G_1) = [3 \ 2 \ 2 \ 2 \ 2 \ 1]^T$. Аналогично для графа, изображенного справа на рисунке 2 — $v(G_2) = [1 \ 2 \ 2 \ 2 \ 2 \ 3]^T$ и $v'(G_2) = [3 \ 2 \ 2 \ 2 \ 2 \ 1]^T$.

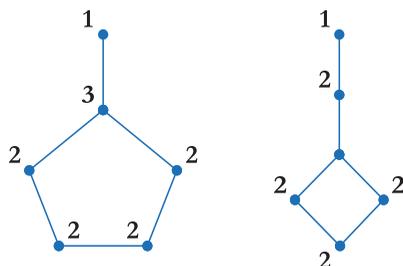


Рис. 2. Неизоморфные графы

Очевидно, что для изоморфизма графов G_1 и G_2 необходима эквивалентность векторов их степеней $v(G_1) = v(G_2)$, но данное условие не является достаточным, как показано в задаче 1 (на рисунке 2 представлена пара неизоморфных графов с одинаковыми векторами степеней).

4. Инварианты. *Плотность (кликое число)* $\phi(G)$ — число вершин наибольшего полного подграфа (наибольшей клики) в G или по-другому — наибольшее число попарно смежных вершин [12]. Инвариантность данной характеристики определяется тем, что при изоморфном соответствии двух графов каждому подмножеству вершин одного графа, порождающему клику, соответствует в другом графе подмножество с тем же количеством вершин и тоже порождающее клику.

Неплотность $\varepsilon(G)$ — число вершин наибольшего безреберного подграфа графа G , то есть наибольшее количество его попарно несмежных вершин.

Число компонент $\kappa(G)$. Граф G является связным, если множество его вершин невозможно разделить на попарно непересекающиеся непустые подмножества так, чтобы никакие две вершины из разных подмножеств не были смежны. Несвязный же граф, естественно, однозначно разделяется указанным образом на подграфы, далее уже не разбиваемые, последние называются компонентами графа G , и их количество обозначается через $\kappa(G)$, если G связан, то $\kappa(G) = 1$.

5. Матрица и вектор смежностей. Задать граф возможно на основе его смежностей или его инцидентий. Наиболее подходящей формой отображения подобной информации является матричная.

Матрицей смежностей (смежности) $A = \{a_{i,j}\}_{i,j=1,\dots,v}$ графа G с v вершинами называется $(v \times v)$ -матрица, в которой:

$$a_{i,j} = \begin{cases} 1, & l_{i,j} \in L, \\ 0, & l_{i,j} \notin L, \end{cases}$$

то есть $a_{i,j} = 1$, если вершина v_i смежна с v_j , и $a_{i,j} = 0$, если нет.

Следовательно, между помеченными v -вершинными графами и симметрическими бинарными квадратными матрицами

размером $(v \times v)$, главная диагональ которых заполнена нулями, наблюдается взаимно однозначное соответствие.

Задача 2. Диаграмма графа изображена слева на рисунке 3. Определить матрицу смежностей.

Дано: G .

Найти: $A(G)$.

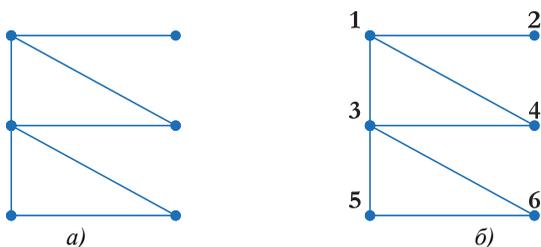


Рис. 3. Графы: а) исходный, б) помеченный

Пронумеруем вершины слева направо, сверху вниз, как показано справа на рисунке 3. Число вершин $v = 6$, следовательно, матрица смежностей имеет размер (6×6) :

$$A(G) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

Очевидно, что степени вершин графа G эквивалентны суммам по строкам элементов матрицы A . В целом же вследствие отождествления графов и матриц с любой графой абстракцией возможно сопоставить описание, определяемое матрицей смежностей. Например, связный граф. Так, некоторый граф G является связным, если не существует такого разбиения $V = V_1 \cup V_2$ множества вершин графа G , что вершины из V_1 и вершины из V_2 не соединимы ребрами графа G . С точки зрения матриц данное определение трактуется следующим образом: граф G связан, если матрица смежностей не имеет приведенную форму

$A = \begin{pmatrix} A' & 0 \\ 0 & A'' \end{pmatrix}$, где A' и A'' — квадратные матрицы при любой возможной нумерации вершин графа G .

Если матрицы смежностей A' и A'' определяются на основе различных нумераций графа G , то для матрицы перестановки P : $A' = P^{-1}A''P$. Возможны варианты, когда задание фиксированной последовательности вершин графа не влияет на анализируемые результаты, например, на физический смысл элементов степеней матрицы смежностей.

Теорема 2. Пусть G — помеченный граф, а его матрица смежностей задается как A . Тогда элемент $a_{i,j}$ матрицы A^n эквивалентен числу маршрутов из v_i в v_j длины n .

Следствие 1. Число простых (v_i, v_j) -цепей длины n равно элементу $a_{i,j}$ матрицы A^n , $i \neq j$.

Следствие 2. Расстояние между вершинами v_i и v_j для $i \neq j$ равно наименьшему целому числу степеней n , для которых элемент $a_{i,j}$ матрицы A^n не равен нулю.

Задача 3. Диаграмма помеченного графа изображена на рисунке 3б. Определить число маршрутов длины 2 из третьего узла в третий и из четвертого в пятый.

Дано: G .

Найти: $(v_3, v_3)_2$, $(v_4, v_5)_2$.

Используем матрицу смежности $A(G)$, полученную в задаче 2. Тогда возведение в квадрат данной матрицы дает все возможные пути длиной два:

$$A^2(G) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 4 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 2 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 2 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 2 \end{bmatrix}.$$

Поскольку $[A^2(G)]_{3,3} = 4$, а $[A^2(G)]_{4,5} = 1$, то число маршрутов из третьего узла в третий равно $(v_3, v_3)_2 = 4$, а из четвертого в пятый — $(v_4, v_5)_2 = 1$. Заметим, что число путей из вершины в саму себя соответствует ее степени.

Следует отметить, что вектор степеней v получается как сумма соответствующих строк матрицы смежностей A , то есть:

$$v = A1_v,$$

где $1_v = [1, 1, \dots, 1]^T$ — единичный вектор размера $(v \times 1)$, либо вектор степеней v может быть определен как вектор, составленный из элементов главной диагонали квадрата матрицы смежностей A^2 , то есть:

$$v = \text{diag}(A^2),$$

где $\text{diag}(X)$ — вектор, составленный из элементов главной диагонали матрицы X .

Необходимо заметить, что два вышеприведенных равенства справедливы при условии упорядочения матрицы смежностей A в порядке неубывания степеней вершин соответствующего ей графа.

Поскольку матрица смежности A симметричная (в случае неориентированных графов) для ее задания достаточно разместить в определенном порядке лишь элементы над главной диагональю, то есть на основе матрицы смежностей A задать *вектор смежностей* a : $A > a$:

$$A = \begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & \cdots & a_{1,v} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & \cdots & a_{2,v} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{v,1} & a_{v,2} & \cdots & a_{v,v} \end{bmatrix} \rightarrow$$

$$\rightarrow a = [a_{1,2}, a_{1,3}, \dots, a_{1,v}, a_{2,3}, a_{2,4}, \dots, a_{2,v}, \dots, a_{v-1,v}]^T.$$

Длина вектора равна $C_v^2 = \frac{v!}{(v-2)!2!}$, где C_i^j — число сочетаний из j по i . Заметим, что данный порядок записи элементов

матрицы смежностей несколько отличается от порядка, используемого в [12]. Это связано, во-первых, с произвольностью выбора элементов над главной диагональю, а во-вторых, как будет показано ниже, подобный порядок позволяет проще формировать коды графов.

Кроме того, согласно теореме Эйлера, число ребер можно рассчитать исходя из вектора смежностей:

$$l = a^T 1_{C_v^2}.$$

6. Мини-код и макси-код. Представление бинарного вектора смежностей a в десятичной форме позволяет сформировать двоичный код матрицы A :

$$\begin{aligned} \mu(A) &= a_{1,2}2^{C_v^2-1} + a_{1,3}2^{C_v^2-2} + \dots + a_{1,v}2^{C_v^2-v} + a_{2,3}2^{C_v^2-v+1} + \\ &+ a_{2,4}2^{C_v^2-v+2} + \dots + a_{2,v}2^{C_v^2-2v-1} + \dots + a_{v-1,v}2^0 = \\ &= \sum_{i=1}^{v-1} \sum_{j=i+1}^v a_{i,j} 2^{\frac{(i-v-1)(i-v)}{2} + k - j + 1}. \end{aligned}$$

Таким образом, двоичный код μ матрицы A представляет собой запись, в которой количество единиц равно $a_{v-1,v}$, количество двоек $a_{v-2,v}$, количество четверок $a_{v-2,v-1}$ и т. д. Двоичные коды матриц смежностей одного и того же графа, соответствующие различным нумерациям его вершин, в общем случае не идентичны, поэтому задают двоичный код матрицы, но не графа.

Наименьший из этих кодов (при всевозможных $v!$ нумерациях) называют мини-кодом $\dot{\mu}(G)$, а наибольший — макси-кодом $\mu(G)$ заданного графа G . Оба эти кода — инварианты, а кроме того, на основе любого из них и числа вершин достаточно просто восстанавливается одна из матриц смежностей графа, а следовательно, и с точностью до изоморфизма сам граф. Следует отметить, что формирование мини-кода $\dot{\mu}$ и макси-кода μ графа G упрощается, если пронумеровать вершины в порядке невозрастания или неубывания, то есть использовать вектор степеней v или обращенный вектор степеней v' соответственно.

Алгоритм расчета мини-кода μ можно представить следующим образом.

Первоначально формируется вектор размера $((v-1) \times 1)$, соответствующий первой строке элементов матрицы смежностей над главной диагональю (первому столбцу под главной диагональю):

$$a_1 = [a_{1,2}, a_{1,3}, \dots, a_{1,v}]^T$$

согласно условию:

$$a_1 = \left\{ a_1 : a_1 = \arg \min_{a_1} \left(\sum_{j=2}^v a_{1,j} 2^{v-j} \right), [v]_1 = [v_1]_1, v_1 \leq v, \right\}, \quad (2)$$

где вектор степеней имеет форму:

$$v_1 = A_1 1_v,$$

а матрица смежностей заполнена только вектором a_1 (все остальные ее элементы равны нулю):

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & a_1^T \\ a_1 & 0 \end{bmatrix}.$$

Далее последовательно находятся все векторы a_i размером $((v-i) \times 1)$:

$$a_i = [a_{1,i+1}, a_{1,i+1}, \dots, a_{1,v}]^T, i = 2, 3, \dots, v-1,$$

согласно условию:

$$a_i = \left\{ a_i : a_i = \arg \min_{a_i} \left(\sum_{j=i+1}^v a_{i,j} 2^{v-j} \right), [v]_i = [v_i]_i, v_i \leq v, \right\}, \quad (3)$$

где вектор степеней имеет форму:

$$v_i = A_i 1_v,$$

а матрица смежностей заполнена только векторами от a_1 до a_i включительно (все остальные ее элементы равны нулю):

$$A_i = \begin{bmatrix} 0 & & & a_1^T & & \\ & 0 & & a_2^T & & \\ & & 0 & \ddots & & \\ a_1 & a_2 & \ddots & 0 & a_i^T & \\ & & & a_i & 0 & \end{bmatrix}.$$

В результате формируется матрица смежностей A_{v-1} , соответствующая мини-коду μ исходного графа.

Для определения макси-кода μ следует использовать ту же последовательность вычислений, за исключением того, что в условиях (2) и (3) требуется вместо вектора степеней v использовать его обращение v' и поменять минимизацию на максимизацию, то есть использовать равенство:

$$a_i = \arg \max_{a_i} \left(\sum_{j=i+1}^v a_{i,j} 2^{v-j} \right), i = 1, 2, \dots, v-1.$$

Задача 4. Диаграмма помеченного графа изображена на рисунке 3б. Определить мини-код и макси-код графа.

Дано: G .

Найти: $\mu(G)$, $\mu(G)$.

Для решения можно использовать матрицу смежностей $A(G)$, полученную в задаче 2, либо ее квадрат $A^2(G)$, вычисленный в задаче 3. В первом случае степени вершин получаются как сумма соответствующих строк матрицы смежностей $A(G)$, а во втором степени вершин есть элементы главной диагонали квадрата матрицы смежностей $A^2(G)$. Таким образом, вектор степеней и его обращение имеют вид:

$$v(G) = [1 \ 2 \ 2 \ 2 \ 3 \ 4]^T, v'(G) = [4 \ 3 \ 2 \ 2 \ 2 \ 1]^T.$$

Условие (2) требует размещение по вектору a_1 , столбца соответствующего смежностям вершины с минимальной степенью $[v]_1 = 1$. Тогда:

$$a_1 = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1]^T,$$

так как $\min_{a_1} \left(\sum_{j=2}^v a_{1,j} 2^{v-j} \right) = 1$.

Матрица смежностей принимает вид:

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

а вектор степеней — $v_j = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$.

Отметим, что условие $v_1 \leq v$ в (2) выполняется, а сам вектор v_1 является неупорядоченным в порядке невозрастания.

Далее проводится размещение по вектору a_2 , соответствующему смежностям вершины с минимальной степенью $[v]_2 = 2$. Тогда

$$a_2 = [0 \ 0 \ 1 \ 1]^T,$$

так как $\min_{a_2} \left(\sum_{j=2}^v a_{2,j} 2^{v-j} \right) = 3$.

Матрица смежностей принимает вид:

$$A_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

а вектор степеней:

$$v_2 = [1 \ 2 \ 0 \ 0 \ 1 \ 2]^T.$$

Продолжая подобную процедуру, получаем:

$$A_5 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, v_5 = [1 \ 2 \ 2 \ 2 \ 3 \ 4]^T.$$

Следует также отметить, что в действительности на четвертом шаге матрица оказывается уже полностью заполненной, а пятый шаг — тривиальным.

Вектор смежностей:

$$a = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0]^T.$$

Соответствующий мини-код:

$$\mu(G) = \mu(A_5) = 1246.$$

Макси-код графа G вычисляется схожим образом. В результате процедур получается:

$$A_5 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, v_5 = [4 \ 3 \ 2 \ 2 \ 2 \ 1]^T.$$

Вектор смежностей:

$$a = [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1]^T.$$

Соответствующий макси-код:

$$\mu(G) = \mu(A_5) = 31489.$$

Количество вершин можно не сообщать, если заранее известно, что у графа нет изолированных вершин. При задании же графа его макси-кодом ясно, что если последний отличен от нуля, то он точно содержит единицу старшего разряда $2^{C_v^2-1}$, то есть отвечает такой нумерации вершин графа, при которой пара $((v-1), v)$ является ребром, в силу чего число вершин v однозначно определяется из условия:

$$C_v^2 - 1 = \lceil \log_2 \mu \rceil,$$

где $\lceil x \rceil$ — округление в большую сторону до ближайшего целого числа x . Отсюда:

$$v = \frac{1}{2} + \sqrt{2 \lceil \log_2 \mu \rceil + \frac{1}{4}}. \quad (4)$$

Следует отметить, что лишь в случае $\mu = 0$, то есть когда рассматривается безреберный граф, число v его вершин может быть любым.

Задача 5. Макси-код первого графа равен 60. Второй граф имеет 4 вершины, а его мини-код равен 15. Определить, являются ли данные графы изоморфными.

Дано: $\mu(G_1) = 60$, $\mu(G_2) = 15$, $v(G_2) = 4$.

Найти: $G_1 \cong G_2$ или $G_1 \not\cong G_2$.

Первоначально необходимо удостовериться, что число вершин в графах совпадает. Для второго графа число вершин дано, а для вычисления количества вершин первого воспользуемся формулой (4):

$$\begin{aligned} v(G_1) &= \frac{1}{2} + \sqrt{2 \lceil \log_2 \mu \rceil} + \frac{1}{4} = \frac{1}{2} + \sqrt{2 \lceil \log_2 60 \rceil} + \frac{1}{4} = \\ &= \frac{1}{2} + \sqrt{2 \lceil 5,907 \rceil} + \frac{1}{4} = \frac{1}{2} + 3,5 = 4. \end{aligned}$$

Таким образом, количество вершин совпадает, и графы могут быть изоморфными.

Далее рассчитываются векторы смежностей обоих графов. Для этого макси-код и мини-код представляются в двоичной системе исчисления:

$$a(G_1) = [111100]^T, a(G_2) = [001111]^T.$$

Соответствующие матрицы смежностей:

$$A(G_1) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, A(G_2) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

Отсюда видно, что $A(G_1) = A^T(G_2)$, что предполагает изоморфизм данных графов. В общем случае целесообразно найти векторы степеней:

$$v(G_1) = [1223]^T, v(G_2) = [1223]^T$$

и для точности построить их диаграммы (на рисунке 4а изображен граф G_1 , а на рисунке 4б — G_2), что также говорит об изоморфизме графов, то есть $G_1 \cong G_2$.

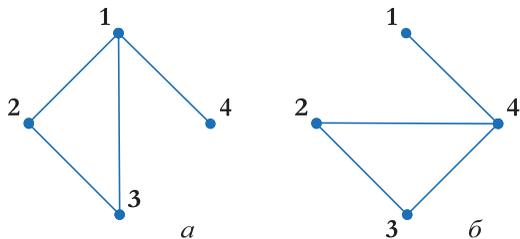


Рис. 4. Два изоморфных графа

7. Матрица инциденций. Матрицей инциденций $V = \{b_{i,j}\}_{i=1,\dots,v, j=1,\dots,l}$ помеченного графа G с v вершинами и l ребрами называется $(v \times l)$ -матрица, в которой

$$b_{i,j} = \begin{cases} 1, & l_j \in L, \\ 0, & l_j \notin L, \end{cases}$$

то есть $b_{i,j} = 1$, если вершина v_i инцидентна ребру l_j , и $b_{i,j} = 0$, если нет. Аналогично матрице смежностей матрица инциденций задает граф G с точностью до изоморфизма. Кроме того, любые $v-1$ строки матрицы инциденций V определяют граф G , так как сумма по модулю 2 любых $v-1$ строк эквивалентна оставшейся v -й строке.

Существует теорема, определяющая взаимосвязь матриц смежностей и инциденций графа G .

Теорема 3. Для любого графа G с v вершинами и l ребрами с матрицей инциденций V

$$A = V^T V - 2I_l,$$

где I_l — единичная матрица размером l ; V^T — матрица, транспонированная к матрице V .

Задача 6. Макси-код графа равен 60. Определить матрицу смежности данного графа.

Дано: $\mu = 60$.

Найти: V .

Воспользуемся результатами задачи 5 для первого графа, у которого матрица смежностей имеет вид:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Тогда, пронумеровав ребра в порядке их упоминания в максикод, получаем, что их количество равно 4: $l_1 = (v_1, v_2)$, $l_2 = (v_1, v_3)$, $l_3 = (v_1, v_4)$, $l_4 = (v_2, v_3)$. При этом матрица инцидентий имеет размер (4×4) :

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

8. Матрица циклов. Рассмотрим граф G , у которого пронумерованы простые циклы и ребра. Матрицей циклов (цикломатической матрицей) $C = \{c_{i,j}\}_{i=1,\dots,n, j=1,\dots,l}$, где n — количество циклов графа G , называется $(n \times l)$ -матрица, в которой элемент $c_{i,j} = 1$, если i -й цикл включает ребро l_j и $c_{i,j} = 0$, если нет.

Существует теорема, указывающая на взаимосвязь матриц циклов и инцидентий. Данный результат в комбинаторной топологии перефразируется так: «граница границы любой цепи нулевая».

Теорема 4. Для графа G с матрицами инцидентий B и циклов C справедливо:

$$CB^T = 0 \pmod{2}.$$

Задача 7. Макси-код графа равен 60. Определить матрицу циклов данного графа.

Дано: $\mu = 60$.

Найти: C .

Воспользуемся результатами задачи 5 для первого графа, у которого матрица смежностей имеет вид:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Проще всего для определения матрицы циклов использовать диаграмму графа (рисунок 4б). Видно, что в данном графе присутствует всего один цикл (v_1, v_2, v_3) или, согласно задаче 6, (l_1, l_4, l_2) , что приводит к векторно-строчному виду матрицы циклов:

$$C = [1101]$$

Для проверки корректности полученной матрицы циклов целесообразно использовать равенство (5):

$$\begin{aligned} CB^T(\text{mod } 2) &= [1101] \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} (\text{mod } 2) = \\ &= [2220](\text{mod } 2) = [0000], \end{aligned}$$

то есть матрица циклов соответствует матрице инцидентий.

Матрица циклов не задает граф с точностью до изоморфизма (в отличие от матриц смежностей и инцидентий). Естественно, что матрица циклов не содержит информации о принадлежности ребра к графу, если оно не содержится ни в одном цикле. Но и при условии исключения подобных ребер, матрица циклов C не идентифицирует однозначно граф G , что иллюстрируется графами, изображенными на рисунке 5. Данные графы содержат одинаковые циклы, а значит, имеют схожую матрицу циклов.

Подобным же образом задается матрица коциклов (разрезов) C' . Каждая вершина двусвязного графа G задает коцикл (минимальный

разрез), состоящий из инцидентных ей ребер. Следовательно, матрица коциклов блока включает его матрицу инцидентий.

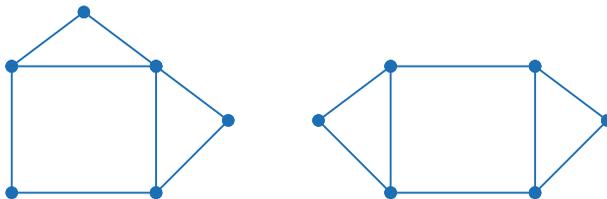


Рис. 5. Два графа с одной и той же матрицей циклов

9. Матрица Кирхгофа. Матрицей Кирхгофа $K = \{k_{i,j}\}_{i,j=1,\dots,v}$ помеченного графа G с v вершинами называется $(v \times v)$ -матрица, в которой:

$$k_{i,j} = \begin{cases} \deg v_i, & i = j, \\ -1, & l_{i,j} \in L, \\ 0, & l_{i,j} \notin L, \end{cases}$$

то есть $k_{i,i} = \deg v_i$ для всех диагональных элементов, $k_{i,j} = -1$, если вершина v_i смежна с v_j , и $k_{i,j} = 0$ в противном случае [10]. Следует отметить, что данное определение является частным случаем матрицы Кирхгофа для единичных проводимостей у всех ребер рассматриваемого графа [10]. Таким образом, можно установить следующие равенства для некоторого неориентированного графа G :

$$K = \text{diag}(A1_v) - A,$$

а в случае упорядоченности строк и столбцов матрицы смежностей в порядке неубывания:

$$K = v - A.$$

Задача 8. Макси-код графа равен 60. Определить матрицу Кирхгофа данного графа.

Дано: $\mu = 60$.

Найти: K .

Воспользуемся результатами задачи 5 для первого графа, у которого матрица смежностей имеет вид:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Тогда:

$$\begin{aligned} K = \text{diag}(A1_v) - A &= \text{diag} \left(\begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \right) - \\ &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \text{diag} \left(\begin{bmatrix} 3 \\ 2 \\ 2 \\ 1 \end{bmatrix} \right) - \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} 3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 & 0 \\ -1 & 1 & 2 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

Заметим, что матрицу Кирхгофа можно получить также на основе диаграммы графа (рисунок 4а), однако ее вид может несколько отличаться из-за перестановки строк и столбцов.

10. Матрица достижимостей. Матрицей достижимостей $D = \{d_{i,j}\}_{i,j=1,\dots,v}$ помеченного v -вершинного графа G называется $(v \times v)$ -матрица, содержащая элементы $d_{i,j} = 1$, если вершина v_i достижима из v_j , и $d_{i,j} = 0$, если нет. Матрицы достижимостей и смежностей связаны следующим соотношением:

$$D = \bigcup_{i=1}^{v-1} A^i \cup \text{diag}(1_v),$$

где \cup — символ объединения.

Последнее: объединяемая матрица $\text{diag}(1_v)$ включена для учета того, что сам любой узел доступен самому себе.

Вектор достижимостей определяется выражением:

$$d = D1_v.$$

11. Заключение. Выбор той или иной формы представления телекоммуникационной сети напрямую связан с типом решаемых задач [6, 7]. Так, при анализе надежности и живучести сети [15] на основе числа остовых деревьев удобным оказывается использование матрицы Кирхгофа; при исследовании свойств связности сети больше подходит матрица достижимостей, а при необходимости передать структуру сложноразветвленной сети на расстояние уже больше подходит представление графа в форме мини-кода или макси-кода. В результате при широком спектре решаемых задач оказывается просто необходимым применение алгоритмических способов преобразования различных представлений структур сетей связи в форме отдельных чисел и инвариантов [16-22]. В данной работе не только приводится аналитический аппарат формирования числовых описаний структур сетей, но и представлены соотношения, выполняющие трансформацию подобных описаний друг в друга.

Литература

1. *Форман Дж.* Много цифр: Анализ больших данных при помощи Excel // М.: Альпина Паблишер. 2016. 464 с.
2. *Остроумова Л.А.* Математические ожидания k -х входящих степеней вершин в случайных графах в модели Боллобаша-Риордана // Труды Московского физико-технического института. 2012. Т. 4. № 1(13). С. 29–40.
3. *Лакеев А. В.* Элементы теории обыкновенных графов : учеб. пособие // Иркутск: Изд-во ИГУ. 2014. 83 с.
4. *Колганов А.С.* Параллельная реализация алгоритма поиска минимальных остовных деревьев с использованием центрального и графического процессоров // Параллельные вычислительные технологии (ПаВТ'2016). 2016. С. 530–543.
5. *Arefin A.S., Riveros C., Berretta R., Moscato P.* kNN-MST-Agglomerative: A fast and scalable graph-based data clustering approach on GPU // 7th International Conference on Computer Science & Education (ICCSE). 2012. pp. 585–590.
6. *Chen P.-Yu, Choudhury S., Hero A.O.* Multi-centrality graph spectral decompositions and their application to cyber intrusion detection. 2016. URL: <http://de.arxiv.org/abs/1512.07372v1>. (дата обращения: 24.01.2017).
7. *Kalofolias S.V., Bresson X., Bronstein M.M., Vandergheynst P.* Robust principal component analysis on graphs. CoRR. 2015. vol. abs/1504.06151. URL: <http://arxiv.org/abs/1504.06151>. (дата обращения: 24.01.2017).
8. *Кристофидес Н.* Теория графов: пер. с англ. // М.: Мир. 1978. 432 с.

9. *Дудник Б.Я., Овчаренко В. Ф.* Надежность и живучесть систем // М.: Радио и связь. 1984. 216 с.
10. *Tam T.* Теория графов: пер. с англ // М.: Мир. 1988. 424 с.
11. *Харари Ф.* Теория графов: пер. с англ., изд. 2-е // М.: Едиториал УРСС. 2003. 296 с.
12. *Зыков А.А.* Основы теории графов // М.: Наука. 1987. 384 с.
13. *Батенков К.А.* Особенности оценки качества функционирования сетей связи // Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее: сборник научных трудов V Международной конференции школьников, студентов, аспирантов, молодых ученых. 2016. Том 1. С. 30–31.
14. *Батенков К.А.* Об анализе живучести сетей связи на основе вероятностного подхода // Неделя науки СПбПУ: материалы научной конференции с международным участием. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та. 2016. С. 6–8.
15. *Егунов М.М., Шувалов В.П.* Анализ структурной надёжности транспортной сети // Вестник СибГУТИ. 2012. №1. С. 54–60.
16. *Tsitsiashvili G.Sh.* Complete calculation of disconnection probability in planar graphs // Reliability: Theory and Applications. 2012. vol.1. no.1. pp. 154–159.
17. *Bollobás B., Riordan O.* The diameter of a scale-free random graph // Combinatorica. 2004. vol. 24. no. 1. pp. 5–34.
18. *Bollobás B., Riordan O., Spencer J., Tusnády G.* The degree sequence of a scale-free random graph process // Random Structures Algorithms. 2001. vol. 18. no.3. pp. 279–290.
19. *Grechnikov E.A.* An estimate for the number of edges between vertices of given degrees in random graphs in the Bollobás–Riordan model // Moscow Journal of Combinatorics and Number Theory. 2011. vol. 1. no. 2. pp. 40–73.
20. *Drinea E., Enachescu M., Mitzenmacher M.* Variations on random graph models for the web // Technical report. Department of Computer Science. Harvard University. 2001.
21. *Dorogovtsev S.N., Mendes J.F.F., Samukhin A.N.* Structure of growing networks with preferential linking // Phys. rev. lett. 2000. vol. 85. pp. 4633.
22. *Kumar R. et al.* Stochastic models for the web graph // Proc. 41st Symposium on Foundations of Computer Science. 2000.
23. *Батенков К.А.* Устойчивость сетей связи // Орел: Академия ФСО России. 2017. 277 с.

Батенков Кирилл Александрович – канд. техн. наук; сотрудник Академии Федеральной службы охраны Российской Федерации. Область научных интересов: статистическая теория связи, модели и методы обработки сигналов, анализ качества сетей связи. Число научных публикаций – 140. pustur@yandex.ru; Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации, ул. Приборостроительная, д. 35, Орёл, 302034, РФ.

K.A. BATENKOV
NUMERIC FEATURES OF NETWORKING

Batenkov K.A. Numeric Features of Networking.

Abstract. Networking description issues, in respect to graph theory, occupy a special place in tasks connected with communications network analysis and synthesis by stability indexes. An approach, implying formal representation of a telecommunications network as a non-oriented graph, is traditional. Graph representation variants based on different number stacks or one number instead of diagrams are considered. In some cases, such description significantly simplifies procedures of stability and other index computation. Thus, the tasks of telecommunications network synthesis can be solved not only by enumeration visual methods but also algorithmically. Examples of computing net-working numeric features for elementary versions are given. In the paper, we not only describe analytical instruments for networking structure declaration but also introduce relationships transforming such descriptions into one another.

Keywords: communications network, graph, structure, invariant, adjacency matrix, incidence matrix, mini-code, maxi-code.

Batenkov Kirill Aleksandrovich – candidate of technical sciences; employee of Academy of Federal Guard Service. Research interests: statistical communication theory, models and methods of signal processing, communications network quality analysis. The number of scientific publications – 140. pustur@yandex.ru; Academy of Federal Guard Service, Priborostroitel'naya str., 35, Orel, 302034, Russian Federation.

References

1. Forman Dzh. *Mnogo cifr: Analiz bol'shih dannyh pri pomoshchi Excel* [Lot numbers: analysis of large data using Excel]. M: Al'pina Pablisher. 2016. 464 p. (In Russ.).
2. Ostroumova L.A. [The expectations k-th incoming vertex degrees of random graphs in Bollobasha-Riordan model]. *Trudy Moskovskogo fiziko-tekhnicheskogo instituta – Proceedings of Moscow Institute of Physics and Technology (State University)*. 2012. Issue 4, vol. 1(13), pp. 29–40. (In Russ.).
3. Lakeev A.V. *Elementy teorii obyknovennykh grafov* [Elements of common graph theory]. Irkutsk: Izd-vo IGU. 2014. 83 p. (In Russ.).
4. Kolganov A.S. [Parallel implementation of the search algorithm of minimum spanning Dere-vev using the CPU and GPU]. *Parallel'nye vychislitel'nye tekhnologii (PaVT'2016)* [Parallel computational technologies (PCT'2016)]. 2016. pp. 530–543. (In Russ.).
5. Arefin A.S., Riveros C., Berretta R., Moscato P. kNN-MST-Agglomerative: A fast and scalable graph-based data clustering approach on GPU. 7th International Conference on Computer Science & Education (ICCSE). 2012. pp. 585–590.
6. Chen P.-Yu, Choudhury S., Hero A.O. Multi-centrality graph spectral decompositions and their application to cyber intrusion detection. 2016. Available at: <http://de.arxiv.org/abs/1512.07372v1> (accessed: 24.01.2017).
7. Kalofolias S.V., Bresson X., Bronstein M.M., Vandergheynst P. Robust principal component analysis on graphs. CoRR. 2015. vol. abs/1504.06151. Available at: <http://arxiv.org/abs/1504.06151>. (accessed: 24.01.2017).
8. Christofides N. *Graph Theory. An algorithmic approach*. Academic Press. 1975. 415 p. (Russ. ed.: Kristofides N. *Teoriya grafov*. M.: Mir. 1978. 432 p.).

9. Dudnik B. YA., Ovcharenko V. F. *Nadezhnost' i zhivuchest' sistem svyazi* [The reliability and survivability of communication systems]. M.: Radio i svyaz'. 1984. 216 p. (In Russ.).
10. Tutte W.T. *Graph Theory*. Addison-Wesley Publishing Company. 1984. 333 p. (Russ. ed.: Tatt U. *Teoriya grafov*. M.: Mir. 1988. 424 p.).
11. Harary F. *Graph theory*. Addison-Wesley Publishing Company. 1969. 274 p. (Russ. ed.: Harari F. *Teoriya grafov*. M.: Editorial URSS. 2003. 296 p.).
12. Zykov A.A. *Osnovy teorii grafov* [The basics of graph theory]. M.: Nauka. Gl. red fiz.-mat. lit. 1987. 384 p. (In Russ.).
13. Batenkov K.A. [Features of an estimation of quality of functioning of communication networks]. *Resursoehfektivnye sistemy v upravlenii i kontrole: vzglyad v budushchee* [Resource-efficient system management and control: a look into the future]. 2016. pp. 30–31. (In Russ.).
14. Batenkov K. A. [On the analysis of survivability of communication networks based on probabilistic approach]. *Nedelya nauki SPbPU* [Science week of SPbSPU]. SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta. 2016. pp. 6–8. (In Russ.).
15. Egunov M.M., Shuvalov V.P. [Analysis of the structural reliability of the transport network]. *Vestnik SibGUTI – Herald of SibGUTI*. 2012. vol. 1. pp. 54–60. (In Russ.).
16. Tsitsiashvili G.Sh. Complete calculation of disconnection probability in planar graphs. *Reliability: Theory and Applications*. 2012. vol.1. no.1. pp. 154–159.
17. Bollobás B., Riordan O. The diameter of a scale-free random graph. *Combinatorica*. 2004. vol. 24. no.1. pp. 5–34.
18. Bollobás B., Riordan O., Spencer J., Tusnády G. The degree sequence of a scale-free random graph process. *Random Structures Algorithms*. 2001. vol. 18. no.3. pp. 279–290.
19. Grechnikov E.A. An estimate for the number of edges between vertices of given degrees in random graphs in the Bollobás–Riordan model. *Moscow Journal of Combinatorics and Number Theory*. 2011. vol. 1. no. 2. pp. 40–73.
20. Drinea E., Enachescu M., Mitzenmacher M. Variations on random graph models for the web. Technical report. Department of Computer Science. Harvard University. 2001.
21. Dorogovtsev S.N., Mendes J.F.F., Samukhin A.N. Structure of growing networks with preferential linking. *Phys. rev. lett.* 2000. vol. 85. pp. 4633.
22. Kumar R. et al. Stochastic models for the web graph. Proc. 41st Symposium on Foundations of Computer Science. 2000.
23. Batenkov K. A. *Ustojchivost' setej svyazi* [Network stability]. Orel: Akademiya FSO Rossii. 2017. 277 p. (In Russ.).

А.Ю. КОВАЛЕНКО
**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОЦЕНИВАНИЯ
РЕЗУЛЬТАТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ
АППАРАТОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ**

Коваленко А.Ю. Математические аспекты оценивания результативности применения космических аппаратов дистанционного зондирования Земли.

Аннотация. Данная статья посвящена оцениванию результативности применения космических аппаратов дистанционного зондирования Земли. В качестве обобщенного показателя результативности предложена вероятность мониторинга космических аппаратов дистанционного зондирования Земли заданного района. Указанная вероятность определяется вероятностью наступления события получения информации об объекте и вероятностью наступления события передачи данных на пункт обработки по каналам систем спутниковой связи. Вероятности получения информации об объекте определяются вероятностью обнаружения объекта в районе и вероятностью его идентификации. Основное внимание уделено оцениванию вероятности обнаружения объекта в районе обслуживания. Данный показатель имеет геометрический смысл, определяющий процент площади района, просмотренный космическим аппаратом. Расчет геометрической вероятности сделан с использованием R -функций. В работе произведено математическое описание полосы обзора и района обслуживания конечными математическими выражениями, на основании которых получены соотношения для расчета площадных показателей просмотра районов земной поверхности.

Ключевые слова: вероятность обнаружения объекта, геометрическая вероятность, R -функции, дистанционное зондирование Земли, результативность.

1. Введение. Основной тенденцией применения космических аппаратов (КА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) является возрастание требований к качеству информации, оперативности ее доставки потребителям, производительности [1]. Результаты применения КА ДЗЗ определяются динамикой процессов, происходящих как на поверхности Земли, так и в среде их функционирования — околоземном космическом пространстве[2].

Процесс функционирования КА ДЗЗ предполагает использовать для оценки эффективности применения КА математические модели, интегрирующие в себе пространственно-временные параметры областей применения КА, характеристики работы бортовой аппаратуры и параметры движения КА, характеристики условий обстановки [3].

Эффективностью применения КА ДЗЗ является ожидаемая мера достижения цели, поставленной перед ними в ходе применения. При этом показатели эффективности выступают в качестве ее численной меры, а критерии эффективности — как совокупность условий, определяющих пригодность, оптимальность или превосходство результатов, оцениваемых действий с точки зрения поставленной в них цели [4]. Исходя из анализа задач, возлагаемых на КА ДЗЗ, целью функ-

ционирования КА в соответствии с принципом Колмогорова является получение информационных данных с поверхности Земли и передача их потребителю [5]. Из множества свойств, присущих процессу мониторинга, существенными являются операционные свойства, определяемые эффектами его результатов:

- результативность мониторинга;
- ресурсозатраты на применение КА ДЗЗ;
- оперативность мониторинга.

Наиболее важные показатели эффективности применения КА ДЗЗ: для результативности — показатель информативности; для ресурсных затрат — показатель производительности [6, 7]; для временных затрат — показатель оперативности применения КА [5].

Рассмотрим показатель результативности как один из значимых с точки зрения получения информации с поверхности Земли. При решении практических задач в качестве показателей информативности часто рассматривают вероятность обнаружения объектов и вероятность их достоверного распознавания (идентификации). Достаточно часто при моделировании применения КА ДЗЗ целесообразно применять вместо указанных показателей информативности параметр, эквивалентный им и являющийся более рациональным либо с точки зрения упрощения модели, либо повышения наглядности представления результатов. В качестве такого эквивалентного параметра может выступать вероятность мониторинга КА ДЗЗ заданного района [8].

Процесс мониторинга заданного района (района обслуживания) на поверхности Земли может включать в себя два события: получение информации об объекте ($ПИ_{KC}$) и передачу данных на пункт обработки по каналам систем спутниковой связи ($ПД_{ССС}$) [9, 10]. В этом случае вероятность мониторинга КА ДЗЗ определится как:

$$P(M_{KC}) = P(ПИ_{KC} \wedge ПД_{ССС}) = P(ПИ_{KC}) \cdot P(ПД_{ССС}), \quad (1)$$

где $P(ПИ_{KC})$ — вероятность наступления события получения информации об объекте; $P(ПД_{ССС})$ — вероятность наступления события передачи данных на пункт обработки по каналам систем спутниковой связи.

Получение информации об объекте ОГ КА ДЗЗ с поверхности Земли заключается в наступлении событий обнаружения ($ОБН$) и идентификации ($ИДН$) объекта [11, 12], то есть:

$$ПИ_{KC} = ОБН \wedge ИДН. \quad (2)$$

В этом случае вероятность получения информации об объекте орбитальными средствами имеет вид:

$$P(ПИ_{КС}) = P(ОБН) \cdot P(ИДН), \quad (3)$$

где $P(ОБН)$ — вероятность обнаружения объекта орбитальными средствами; $P(ИДН)$ — вероятность идентификации объекта, обнаруженного орбитальными средствами.

Решение проблемы идентификации объектов в процессе их дистанционного зондирования из космоса определяется главным образом уровнем предельного пространственно-частотного разрешения бортовой регистрирующей аппаратуры, степенью искажения и трансформации соответствующих оптических сигналов при их прохождении через рассеивающую и поглощающую земную атмосферу, а также точностью методов, используемых при распознавании (идентификации) радиационных образов объектов в рамках тематической интерпретации и анализа многоспектральной спутниковой информации [13]. Фактически идентификация объекта определяется на основе оптико-физических аспектов формирования образов в системе «объект-фон» и в частности формирования в ней спектральных контрастов и других базовых признаков, которые и определяют в конечном итоге возможность (вероятность) идентификации объекта [6, 7]. В данной работе вероятность идентификации объекта относится к исходным данным, которая определяется на основании апробированных методик и алгоритмов, а также характеризуется тактико-техническими характеристиками конкретных орбитальных средств ДЗЗ [14, 15].

Вероятность обнаружения объекта в заданном районе $P(ОБН)$ заключается в наступлении события попадания объекта в мгновенную зону обзора КА. Данный показатель имеет геометрический смысл, определяющий процент площади района, обслуженный КА [7]. Расчет вероятности обнаружения объекта базируется на прогнозировании просмотра заданных районов [16]. Для прогнозирования просмотра районов обслуживания необходимо решить задачу математического описания заданного района и полосы (мгновенной зоны) обзора КА [17].

Основным методом аналитической геометрии является метод координат, предложенный Декартом. Метод координат позволяет беспредельно увеличивать класс кривых и поверхностей в связи с тем, что каждое новое уравнение дает новую поверхность или линию. Исходя из этого, в геометрии как отрасли математики наибольшее развитие получило изучение и анализ различных кривых и поверхностей, описываемых заданными уравнениями. Обратная же задача о построении

уравнения, соответствующего заданному геометрическому объекту, требует привлечения специфического математического аппарата — так называемых R -функций. Подмножество функций непрерывного аргумента, имеющих ряд свойств функций алгебры логики, носит название R -функций. В основу аппарата R -функций положен тот факт, что во многих случаях знак результата операции определяется знаками входящих в операцию величин, которые можно рассматривать как двоичные переменные, тогда принадлежность любой действительной величины к классу отрицательных или положительных величин определяется функцией $sign$ [18].

2. Постановка задачи построения уравнения границы области по заданной логике. Предположим, что дана булева функция:

$$D = F(D_1, D_2, \dots, D_m), \quad (4)$$

где области $(D_1), (D_2), \dots, (D_m)$ определяются соответствующими неравенствами:

$$f_1(x, y) \geq 0; f_2(x, y) \geq 0; \dots; f_m(x, y) \geq 0. \quad (5)$$

Требуется с помощью некоторой базисной системы (H) функций:

$$\alpha_1(u_1, u_2, \dots, u_m), \alpha_2(u_1, u_2, \dots, u_m), \dots, \alpha_n(u_1, u_2, \dots, u_m) \quad (6)$$

построить (если это возможно) такую функцию $\varphi(u_1, u_2, \dots, u_m)$, определенную в каждой точке пространства $\wp\{u_1, u_2, \dots, u_m\}$ и имеющую непрерывные частные производные k -го порядка, чтобы выражение:

$$\varphi(x, y) \equiv \varphi[f_1(x, y); f_2(x, y); \dots; f_m(x, y)] \geq 0 \quad (7)$$

определяло область (D) .

Необходимо заметить, что если функция $\varphi(u_1, u_2, \dots, u_m)$ будет построена, то уравнение:

$$\varphi(x, y) \equiv \varphi[f_1(x, y); f_2(x, y); \dots; f_m(x, y)] = 0 \quad (8)$$

будет соответствовать уравнению границы области (D) . В тоже время, если области (D_i) ($i=1, 2, \dots, m$) ограничены кусочно-гладкими кривыми, то область (D) будет также иметь кусочно-гладкую границу, которая может состоять из нескольких участков, не обязательно связанных между собой.

3. Уравнение границы произвольной области. Рассмотрим решение общей задачи, сформулированной выражениями (4)-(8).

Так как $\varphi(u_1, u_2, \dots, u_m)$ является R -функция соответствующей булевой функции $F(D_1, D_2, \dots, D_m)$, то предикат:

$$\{\varphi[f_1(x, y), f_2(x, y), \dots, f_m(x, y)] \geq 0\} \quad (10)$$

принимает значение истинности во всех точках области (D) , определяемой выражением (4) и значение лжи вне этой области [15].

Предположим, что дана некоторая базисная система (H) функций:

$$\alpha_1(x, y), \alpha_2(x, y), \dots, \alpha_m(x, y), \quad (11)$$

с помощью которой в соответствии с правилами построения сложных функций строится множество \wp . Предположим, что функции $f_1(x, y) \geq 0$; $f_2(x, y) \geq 0$; ...; $f_m(x, y)$ могут быть построены с помощью базисной системы функций (11) как сложные функции с использованием произвольных постоянных, а также, что с помощью системы функций $x \wedge_\alpha y, x \vee_\alpha y, \bar{x}$ можно построить по крайней мере одну функцию класса R -функций, то есть указанная система функций $x \wedge_\alpha y, x \vee_\alpha y, \bar{x}$ будет является полной по отношению к классу R -функций. Если же дополнить систему функций (11) R -функциями $x \wedge_\alpha y, x \vee_\alpha y, \bar{x}$, тогда полученная система функций будет определять неравенство (5), какова бы ни была исходная булева функция (4), определяющая логику построения области (D) . В тоже время, если функция $f_i(x, y)$ ($i=1, 2, \dots, m$) является реализуемой в базисной системе функций, то какова бы ни была логика построения области (D) с помощью области (D_i) ($i=1, 2, \dots, m$), левая часть неравенства (7) может быть построена с помощью системы функций:

$$\alpha_1(x, y), \alpha_2(x, y), \dots, \alpha_n(x, y), x \wedge_\alpha y, x \vee_\alpha y, \bar{x}. \quad (12)$$

Необходимо заметить, что вместо функций $x \wedge_\alpha y, x \vee_\alpha y, \bar{x}$ в систему (12) можно включить любую другую полную по отношению к классу R -функций систему функций [18]. Однако, на практике удобнее пользоваться R -конъюнкцией и R -дизъюнкцией одновременно, которые определяются следующими соотношениями:

$$\begin{cases} x \wedge_\alpha y = \frac{1}{2}(x + y - \sqrt{x^2 + y^2 - 2\alpha xy}) \\ x \vee_\alpha y = \frac{1}{2}(x + y + \sqrt{x^2 + y^2 - 2\alpha xy}), \\ \bar{x} = -x \end{cases}$$

где α — произвольная величина, заключенная в пределах $-1 < \alpha \leq 1$.

Вышеизложенные положения рассмотрены для случая построения области на плоскости, однако данные положения могут быть использованы для построения уравнений кусочно-гладких поверхностей, ограничивающих области в трехмерном пространстве. В этом случае в систему базисных элементов, описывающих какую-либо область наряду с различными линиями, могут входить и отдельные области.

4. Математическое описание районов обслуживания. Прогнозирование мониторинга районов земной поверхности подразумевает необходимость математического описания заданного района Земной поверхности. Рассмотрим математическое описание районов обслуживания с применением аппарата R -функций на основе использования в качестве системы базисных элементов сечения шара и прямоугольников.

Выведем уравнение сечения сферической Земли в сферической системе координат. Уравнение плоскости в нормальной форме имеет вид:

$$x \cos \alpha + y \cos \beta + z \cos \gamma - p = 0, \quad (13)$$

где α, β, γ — направляющие косинусы вектора, нормального к плоскости; p — длина вектора, нормального к плоскости.

Запишем уравнение плоскости в сферической системе координат, для этого выразим составляющие уравнения через сферические функции:

$$\left. \begin{aligned} \cos \alpha &= \cos \psi_1 \cos \lambda_1 \\ \cos \beta &= \cos \psi_1 \sin \lambda_1 \\ \cos \gamma &= \sin \psi_1 \end{aligned} \right\},$$

$$\left. \begin{aligned} x &= R_3 \cos \psi \cos \lambda \\ y &= R_3 \cos \psi \sin \lambda \\ z &= R_3 \sin \psi \end{aligned} \right\}, \quad (14)$$

$$p = R_3 \cos \beta,$$

где ψ_1, λ_1 — геоцентрические широта и долгота центра сечения сферической Земли плоскостью; ψ, λ — геоцентрические широта и долгота точки сферической Земли; R_3 — радиус сферической Земли; β — заданный полуугол раствора сечения.

Таким образом, для описания сечения сферической Земли с заданным полууглом раствора β существует уравнение вида:

$$\begin{aligned} &R_3 \cos \psi_1 \cos \lambda_1 \cos \psi \cos \lambda + R_3 \cos \psi_1 \sin \lambda_1 \cos \psi \times \\ &\times \sin \lambda + R_3 \sin \psi_1 \sin \psi - R_3 \cos \beta \geq 0. \end{aligned} \quad (15)$$

или после соответствующих преобразований:

$$\cos \psi_1 \cos \psi \cos(\lambda_1 - \lambda) + \sin \psi_1 \sin \psi - \cos \beta \geq 0. \quad (16)$$

Подобное аналитическое выражение можно применить для описания района подвижного объекта, для которого известно математическое ожидание точки базирования с координатами ψ_1, λ_1 и вероятное отклонение от точки в угловой мере E_β . Тогда уравнение района будет иметь вид:

$$\cos \psi_1 \cos \psi \cos(\lambda_1 - \lambda) + \sin \psi_1 \sin \psi - \cos E_\beta \geq 0. \quad (17)$$

В целом район может быть довольно сложной конфигурации, и поэтому возникает задача его аппроксимации различного рода элементарными областями.

Допустим, что элементарными областями являются сечения шара. Тогда район можно описать, используя пересечения и объединения элементарных районов (рисунок 1):

$$D = (D_1 \wedge D_2) \vee D_3 \vee D_4. \quad (18)$$

Следует отметить, что при неограниченном увеличении числа элементарных районов и при стремлении в каждом из них полуугла раствора β_i к 0, получается точное уравнение района заданной конфигурации.

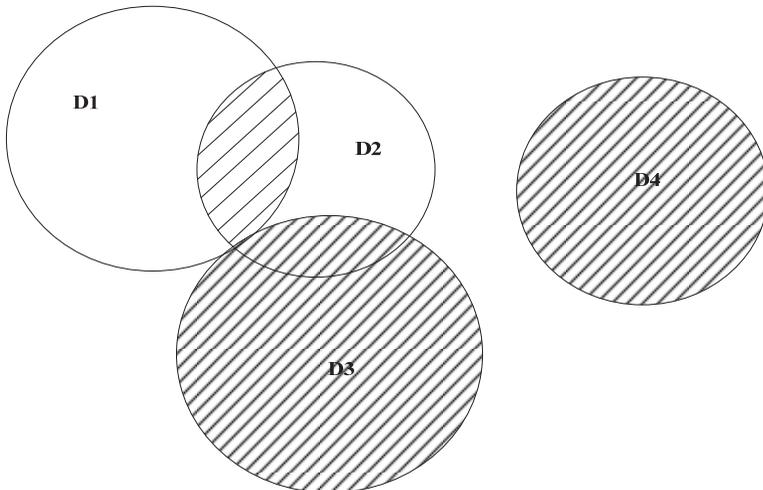


Рис. 1. Определение района сечениями шара

Уравнение района, состоящего из пересечений и объединений элементарных районов, составляется с использованием R -операций (12). Особенность уравнения района, составленного при объединении элементарных районов, в необязательности соприкосновения последних. Это позволяет получить одно общее уравнение подрайонов, расположенных в различных частях земного шара.

Если в уравнении (16) положить $\beta = 0$, то получается уравнение точки на сфере. Тогда объединение элементарных областей, представляющих собой уравнения точек, дает уравнение группы точечных объектов.

Рассмотрим математическое описание районов обслуживания на основе использования в качестве системы базисных элементов прямоугольников. Предположим, что район обслуживания задан в виде прямоугольника. В этом случае для математического описания прямоугольного района необходимо описать область сферического пояса и область сферического сектора [18].

Пусть сферический пояс задан значениями геоцентрической широты ψ_n и ψ_e (рисунок 2) и определяется следующей булевой функцией:

$$f = f_1 \wedge \bar{f}_2, \quad (19)$$

где $f_1 = \sin \psi - \sin \psi_n \geq 0$, $f_2 = \sin \psi - \sin \psi_e \geq 0$.

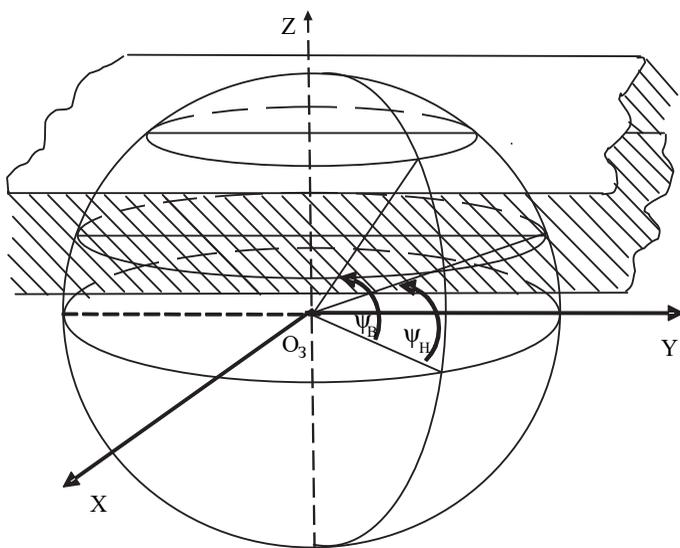


Рис. 2. Определение сферического пояса

Использование R -операций позволяет определить сферический пояс в следующем виде:

$$f = f_1 \wedge \bar{f}_2 = f_1 + \bar{f} - |f_1 - \bar{f}|. \quad (20)$$

В конечном математическом виде выражение (20) имеет вид:

$$f = \sin \psi_g - \sin \psi_n - |2 \sin \psi - \sin \psi_g - \sin \psi_n| \geq 0. \quad (21)$$

Область сферического сектора определяется как часть сферы, ограниченной меридиональными плоскостями (рисунок 3).

$$b = p_1 \wedge p_2 = p_1 + p_2 - |p_1 - p_2|, \quad (22)$$

где p_1 — меридиональная плоскость, проходящая через меридиан долготой λ_1 ; p_2 — меридиональная плоскость, проходящая через меридиан долготой λ_2 .

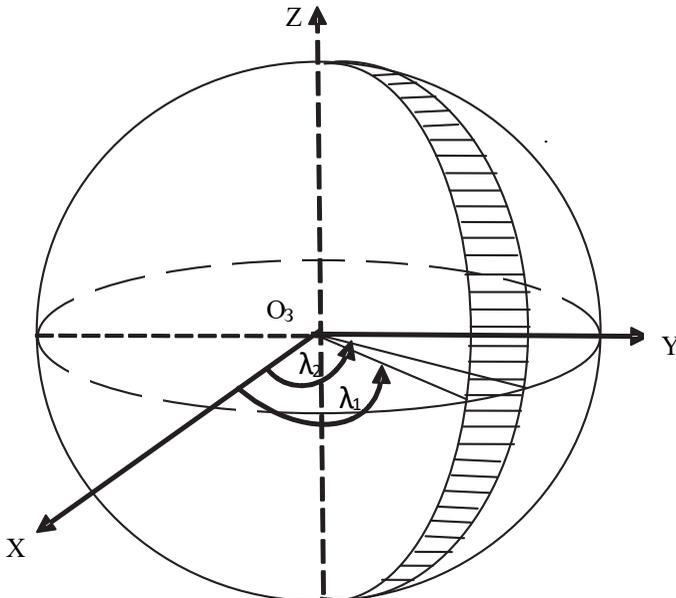


Рис. 3. Определение сферического сектора

Выражение области, ограниченной плоскостью p_1 , имеет вид:

$$p_1 = \cos(\frac{\pi}{2} + \lambda_1) \cos \lambda + \sin \lambda \cos \lambda_1 = \sin(\lambda - \lambda_1) \geq 0. \quad (23)$$

Область, ограниченная плоскостью p_2 , описывается следующим образом:

$$p_2 = -\sin(\lambda - \lambda_2) = \sin(\lambda_2 - \lambda) \geq 0. \quad (24)$$

Область, ограниченная пересечением области сферического пояса и области сферического сектора, представляет собой прямоугольный район земной поверхности, то есть уравнение района имеет следующий вид:

$$R = f \wedge b = f + b - |f - b|, \quad (25)$$

где R — уравнение прямоугольного района.

5. Построение уравнения района с учетом коэффициентов важности подрайонов. В практике обеспечения применения КА ДЗЗ возникает задача разбиения района на определенное количество подрайонов с присвоением каждому коэффициента важности. Такое разбиение оправдано при решении каких-либо узкоспециализированных задач [19]. В частности, при мониторинге акваторий мирового океана участкам районов обслуживания, приходящимся на мелководье, где нахождение крупнотоннажных судов невозможно, могут быть присвоены меньшие коэффициенты важности, чем участкам района, приходящимся на глубоководные участки. В качестве примера можно привести мониторинг акватории Финского залива Балтийского моря, который характеризуется достаточно небольшими глубинами вне фарватера, соответственно, участки района, приходящиеся на фарватер, будут иметь больший коэффициент важности, чем остальные участки района, на которых затруднено крупнотоннажное судоходство.

Представим уравнение подрайона в нормализованной форме, то есть таким образом, чтобы значение функции, описывающей подрайон, было независимо от положения текущей точки. Потребуем также, чтобы это уравнение обладало следующими свойствами: если точка находится вне подрайона, то функция равна нулю, если же точка находится на границе или внутри области, то функция равна единице. Очевидно, что подобное преобразование исходного уравнения можно осуществить с помощью функции $sign$, которая принимает следующие значения:

$$sign(x) = \begin{cases} 1, & \text{если } x > 0 \\ 0, & \text{если } x = 0 \\ -1, & \text{если } x < 0 \end{cases}. \quad (26)$$

Тогда уравнение подрайона в нормализованной форме с учетом перечисленных условий можно записать в следующем виде:

$$n_i = \text{sign}[\text{sign}(p_i) + 1] . \quad (27)$$

Действительно, если точка находится вне области, то функция $p_i < 0$, тогда $n_i = 0$, если же $p_i \geq 0$, то функция $n_i = 1$. Допустим, что в i -м подрайоне имеется N_i точек, коэффициент важности каждой из которых равен α_k . Определим средний коэффициент важности точки подрайона:

$$\bar{\alpha}_k = \frac{\sum_{k=1}^{N_i} \alpha_k}{N_i} . \quad (28)$$

Средняя площадь поверхности подрайона, приходящаяся на одну точку, определится из формулы:

$$\bar{S}_i = \frac{S_i}{N_i} , \quad (29)$$

где S_i — площадь подрайона.

Тогда средний коэффициент важности элементарной площади, очевидно, равен:

$$\bar{\beta}_i = \frac{\bar{\alpha}_k}{\bar{S}_i} . \quad (30)$$

Коэффициент важности всего подрайона определится, следовательно, по формуле:

$$C_i = \bar{\beta}_i N_i = \frac{\sum_{k=1}^{N_i} \alpha_k}{N_i} \frac{N_i}{\bar{S}_i} N_i = \frac{N_i \sum_{k=1}^{N_i} \alpha_k}{\bar{S}_i} . \quad (31)$$

После определения коэффициента важности C_i каждого подрайона можно получить его уравнение с учетом важности:

$$\alpha_i = C_i n_i \quad (32)$$

и по указанным выше методам получить уравнение заданного района.

6. Прогнозирование просмотра заданного района обслуживания. Данная задача предполагает, что известны спрогнозированные во времени значения оскулирующих элементов (Ω , ω , i , a , e , τ). Прогнозирование оскулирующих элементов осуществляется путем решения системы дифференциальных уравнений (33) численными методами.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{da}{du} = \gamma_1 \frac{r^2}{\mu} \frac{2a}{1-e^2} \left(S e \sin \vartheta + T \frac{p}{r} \right), \\ \frac{de}{du} = \gamma_1 \frac{r^2}{\mu} \left\{ S \sin \vartheta + T \left[\left(1 + \frac{r}{p} \right) \cos \vartheta + e \frac{r}{p} \right] \right\}, \\ \frac{d\Omega}{du} = \gamma_1 \frac{r^3}{\mu p} \frac{\sin u}{\sin i} W, \\ \frac{di}{du} = \gamma_1 \frac{r^3}{\mu p} \cos u W, \\ \frac{d\omega}{du} = \gamma_1 \frac{r^2}{\mu} \left\{ \frac{1}{e} \left[-S \cos \vartheta + T \left(1 + \frac{r}{p} \right) \sin \vartheta \right] - W \frac{r}{p} \operatorname{ctg} i \sin u \right\}, \\ \frac{d\tau}{du} = \gamma_1 \frac{p}{e\mu} \frac{r^2}{\sqrt{p\mu}} \left[e I_1 \sin(u - \omega) - \frac{\cos(u - \omega)}{[1 + e \cos(u - \omega)]^2} \right] S + \\ + \gamma_1 \frac{p}{e\mu} \frac{r^2}{\sqrt{p\mu}} [1 + e \cos(u - \omega)] I_1 T, \end{array} \right. \quad (33)$$

где $\gamma_1 = \frac{1}{1 - \frac{p}{\mu} r \operatorname{ctg} i \sin u W}$; $I_1 = 2 \int_0^{\vartheta} \frac{\cos \vartheta d\vartheta}{(1 + e \cos \vartheta)^2}$; S , T , W — проекции

возмущающего ускорения на радиальное, трансверсальное и бинормальное направления; r — текущие значения радиуса орбиты; p — фокальный параметр; u — аргумент широты КА; ϑ — истинная аномалия; μ — гравитационная постоянная центрального гравитационного поля Земли.

При малых возмущающих ускорениях S , T , W численная величина коэффициента γ_1 близка к единице. Поэтому, как правило, при изучении движения искусственных спутников Земли на базе системы уравнений (33) принимают, что $\gamma_1 = 1$.

Правые части первых уравнений систем (33) стремятся к бесконечности, когда относительный эксцентриситет приближается к еди-

нице. Поэтому для таких орбит вместо большой полуоси следует использовать фокальный параметр p . Тогда первые уравнения в этих системах следует заменять следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} \frac{dp}{dt} &= 2T \sqrt{\frac{p}{\mu}} r, \\ \frac{dp}{d\vartheta} &= 2\gamma \frac{r^3}{\mu} T, \\ \frac{dp}{du} &= 2\gamma_1 \frac{r^3}{\mu} T. \end{aligned} \quad (34)$$

Помимо оскулирующих элементов для решения задачи прогнозирования просмотра заданного района необходимо наличие динамических уравнений траассы КА совместно с их полосами обзора [20, 21].

Предположим, что за время Δt КА сместился из точки 1 в точку 2 (рисунок 4).

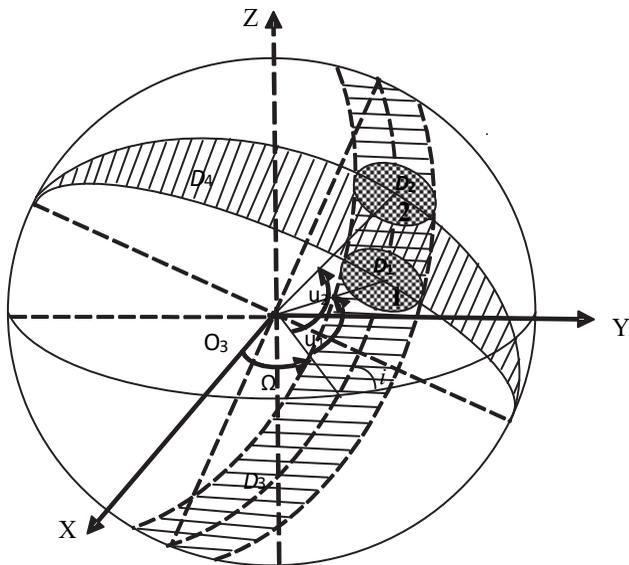


Рис. 4. Проекция зоны обзора КА на земной шар

За это время на неподвижной Земле аппарат просмотрит область D (определяемую геоцентральным углом φ_3), состоящую из четырех элементарных областей:

1. мгновенной зоны обзора D_1 в момент времени t_1 ;
2. мгновенной зоны обзора D_2 в момент времени t_2 ;
3. пояса шириной (D_3), равной геоцентральному углу обзора ϕ_3 как функция высоты H ;
4. сектора D_4 , образованного плоскостями, перпендикулярными плоскости орбиты и проходящими через положение аппарата в моменты времени t_1 и t_2 .

Тогда уравнение обозреваемой области на поверхности неподвижной Земли определится следующей булевой функцией [18]:

$$D = (D_1 \vee D_2) \vee (D_3 \wedge D_4). \quad (35)$$

Математические выражения, описывающие области D_1, D_2, D_3 и D_4 формируются на основе математического аппарата R -функций [18].

Области D_1 и D_2 представляют собой сечения сферы плоскостями. Выражения, описывающие области D_1 и D_2 имеют вид:

$$F_1 = \cos \phi (\cos u_1 \cos (\lambda - \Omega) + \sin u_1 \sin (\lambda - \Omega) \cos i) + \sin u_1 \sin i \sin \phi - \cos \phi_3 \geq 0,$$

$$F_2 = \cos \phi (\cos u_2 \cos (\lambda - \Omega) + \sin u_2 \sin (\lambda - \Omega) \cos i) + \sin u_2 \sin i \sin \phi - \cos \phi_3 \geq 0.$$

Область D_3 представляет собой пересечение областей, ограниченных двумя плоскостями орбиты. Выражение, описывающее данную область, имеет вид:

$$F_3 = \cos \phi_3 - |\sin i \cos \phi \sin (\Omega - \lambda) + \cos i \sin \phi| \geq 0.$$

Сектор D_4 описывается следующим соотношением:

$$F_4 = (c_1 + \alpha_1) \cos \phi \cos \lambda + (c_2 + \alpha_2) \cos \phi \sin \lambda + (c_3 + \alpha_3) \sin \phi - \\ - |(c_1 - \alpha_1) \cos \phi \cos \lambda + (c_2 - \alpha_2) \cos \phi \sin \lambda + (c_3 - \alpha_3) \sin \phi| \geq 0,$$

где $c_1, c_2, \alpha_1, \alpha_2$ — направляющие косинусы.

На основании уравнений элементарных областей формируется уравнение обозреваемой области на поверхности Земли при движении КА с момента t_1 до момента t_2 :

$$\Phi = (F_3 \wedge F_4) \vee F_1 \vee F_2 = F_3 + F_4 - |F_3 - F_4| + F_1 + \\ + |F_3 + F_4 - |F_3 - F_4| - F_1| + F_2 + |F_3 + F_4 - |F_3 - F_4| + F_1| + \\ + |F_3 + F_4 - |F_3 - F_4| - F_1| - F_2|. \quad (36)$$

Для случая вращающейся Земли необходимо учитывать изменение оскулирующих элементов во времени $t \in [t_1, t_2]$, то есть:

$$\left. \begin{aligned} u &= u(t) \\ i &= i(t) \\ \Omega &= \Omega(t) - \omega_3 t \\ \varphi_3 &= \varphi_3(H) \end{aligned} \right\}, \quad (37)$$

где ω_3 — угловая скорость вращения Земли.

Выражение (36) с учетом выражения (37) является динамическим уравнением трассы полета вместе с полосой обзора $\Phi(t)$. На основании полученного уравнения формируется уравнение оставшейся части (непокрытой) района.

Уравнение непокрытой части района будет иметь вид:

$$r = R \wedge \bar{\Phi}(t) = R - \Phi(t) - |R + \Phi(t)|, \quad (38)$$

где R — уравнение района; $\Phi(t)$ — динамическое уравнение обозреваемой области.

Исходя из полученных выражений (25) и (38) рассчитываются вероятность обнаружения объекта в заданном районе за заданный интервал времени.

$$P(\text{ОБН}) = 1 - \frac{\iint_D r d\varphi d\lambda}{\iint_D R d\varphi d\lambda}. \quad (39)$$

7. Заключение. Применение математического аппарата R -функций позволяет осуществлять математическое описание границ областей (как районов обслуживания, так и зон обзора КА) любой степени сложности, а также формировать единую функцию для совокупности нескольких районов в следующем виде:

$$R_o = \bigvee_{i=1}^n R_i,$$

где R_o — уравнение совокупности районов; R_i — уравнение i -го района.

Также необходимо заметить, что полученные уравнения районов обладают следующим свойством: функция, описывающая район, отрицательна, если точка находится вне района, равна нулю, если точ-

ка находится на границе района, и положительна, если точка находится внутри района, причем значение имеет только знак функции, а значение может быть любым.

С практической точки зрения задача мониторинга может формулироваться как обнаружение объекта в заданном районе за заданный интервал времени [22, 23]. В этом случае на основании прогнозирования просмотра заданного района определяются вероятности обнаружения объекта для каждого состоявшегося события обзора района (в случае если в течении заданного времени КА неоднократно обзоревает заданный район) [24, 25], тогда вероятность обнаружения объекта за заданный интервал времени имеет вид:

$$P(\text{ОБН})_T = P\left(\sum_{i=1}^k \text{ОБН}_i\right), \quad (40)$$

где $P\left(\sum_{i=1}^k \text{ОБН}_i\right)$ — вероятность суммы вероятностей событий обнаружения объекта при i -том просмотре района обслуживания; k — кратность просмотра района обслуживания.

Используемый математический аппарат позволяет оценить решение задач мониторинга с точки зрения определения вероятности обнаружения объекта для любого района поверхности Земли. Рассмотрим район, образованный пересечением широтного пояса с границами $\psi_s = 78^0$, $\psi_n = 72^0$ северной широты и сферического сектора с границами $\lambda_1 = 20^0$ западной долготы и $\lambda_2 = 20^0$ восточной долготы. На основании выражений (20) и (21) определяется выражение, описывающее границы пояса:

$$f \approx 0.027 - |2 \sin \psi - 1.929|. \quad (41)$$

Уравнение сферического сектора определяется на основании выражений (22) – (24) и имеет вид:

$$b = 2(\sin 20^0 \cos \lambda - |\cos 20^0 \sin \lambda|) \approx 2(0.342 \cos \lambda - 0.94 \cdot |\sin \lambda|). \quad (42)$$

С учетом полученных выражений (41) и (42) уравнение района примет следующий вид:

$$R \approx 0,027 - |2 \sin \psi - 1.929| + 2(0.342 \cos \lambda - 0.94 \cdot |\sin \lambda| - |0.027 - |2 \sin \psi - 1.929| - 2(0.342 \cos \lambda - 0.94 \cdot |\sin \lambda|)|) \quad (43)$$

Прогнозирование просмотра указанного района рассмотрим на примере КА ДЗЗ, движение которого определяется следующими оскулирующими элементами: $\Omega = 157.656^0$, $\omega = 60.789^0$, $i = 98.102^0$, $a = 7065144.609$ м, $e = 0.001$, $\vartheta = 300.916^0$ [26, 27]. Прогнозирование осуществлялось на интервале времени $t \in [t_1, t_2]$, где $t_1 = 3^u 00^m 00^c 15.01.2017$, $t_2 = 3^u 00^m 00^c 16.01.2017$. Формирование конечного уравнения трассы полета вместе с полосой обзора $\Phi(t)$ осуществлялось аналогично выражениям (41)–(43). В результате были получены следующие результаты, приведенные в таблице 1.

Таблица 1. Результаты прогнозирования просмотра района

Начало просмотра района		Окончание просмотра района		$P(ОБН)$
Дата	Время	Дата	Время	
15.01.2017	7:24:59	15.01.2017	7:26:29	0.25
15.01.2017	9:01:59	15.01.2017	9:04:59	0.5
15.01.2017	23:55:29	15.01.2017	23:57:29	0.3125
16.01.2017	1:33:29	16.01.2017	1:35:59	0.5625

Исходя из полученных промежуточных результатов итоговая вероятность обнаружения объекта за заданный интервал времени, в соответствии с теоремой сложения вероятностей совместных событий, составит $P(ОБН)_T = 0.887$.

Литература

1. Свиридов К.Н. О предельном разрешении аэрокосмических систем дистанционного зондирования земли (ДЗЗ) // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2014. Т. 1. № 1. С. 34–40.
2. Стратилатова Н.Н., Куренков В.И., Кучеров А.С., Егоров А.С. Методика сравнительной оценки эффективности космических аппаратов дистанционного зондирования Земли с различными оптико-электронными телескопическими комплексами // Вестник самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2016. Т. 15. № 2. С. 80–89.
3. Коваленко А.Ю. Баллистическое проектирование разнородной системы КА с заданным циклом замыкания трассы // Труды СПИИРАН. 2015. № 3(40). С. 45–54.
4. Абчук В.А. Справочник по исследованию операций // М.: Воениздат. 1979. 368 с.
5. Волгин Д.А. Космическая программа дистанционного зондирования земли (ДЗЗ) и группировка космических аппаратов (КА) России // Научные труды института непрерывного профессионального образования. 2016. № 6(6). С.211–216.
6. Gorelov Yu.N. et al. On Optimization Of Attitude Control Programs For Earth Remote Sensing Satellite // Gyroscopy and Navigation. 2014. vol. 5. no. 2. pp. 90–97.
7. Gorelov Yu.N., Manturov A.I., Yurin V.E., Pyrinov N.I. Generation Of Satellite Attitude Control Programs For Stereo Imaging // Proceedings of the 22nd Saint-

- Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS 2015). 2015. pp. 120–122.
8. Коваленко А.Ю., Мосин Д.А., Уртминцев И.А. Оценка эффективности обслуживания произвольного района земной поверхности КА ДЗЗ в целях экологического мониторинга // Экология и развитие общества. 2015. № 4(15). С. 45–50.
 9. Коваленко А.Ю., Кубасов И.Ю. Методика оценивания эффективности обзора КА произвольных районов земной поверхности // Труды девятнадцатой Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы защиты и безопасности». 2016. Том 1. С. 136–139.
 10. Dash J., Ogutu B.O. Recent advances in space-borne optical remote sensing systems for monitoring global terrestrial ecosystems // Progress In Physical Geography. 2015. vol. 40. no. 2. pp. 322–351.
 11. Свиридов К.Н. О новом подходе к получению и обработке изображений ДЗЗ, искаженных турбулентной атмосферой // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2014. Т. 1. № 4. С.28–36.
 12. Nazmudinova A.I., Itskov A.G., Milich V.N. Description of the process of presentation and recognition of forest vegetation objects on multispectral space images // Pattern Recognition and Image Analysis (Advances In Mathematical Theory and Applications). 2017. vol. 27. no. 1. pp. 105–109.
 13. Han Y., Koike H., Idesawa M. Recognizing objects with multiple configurations // Pattern analysis & applications. 2014. vol. 17. no. 1. pp. 195–209.
 14. Дарных В.В., Малышев В.В., Усовик И.В. Многокритериальная оптимизация эффективности целевого функционирования орбитальных группировок систем дистанционного зондирования Земли на основе оперативного планирования // Вестник московского авиационного института. 2014. Т. 21. № 5. С.37–52.
 15. Лаверов Н.П., Попович В.В., Ведешин Л.А., Гальяно Ф.Р. Методы анализа данных дистанционного зондирования Земли // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 6. С. 145–153.
 16. Reshmin S. A. Properties of the time-optimal control for Lagrangian single-degree-of-freedom systems // IEEE Transactions on Automatic Control. 2015. vol. 60. no. 12. pp. 350–355.
 17. Власов С.А., Кульвиц А.В., Кубасов И.Ю., Мосин Д.А. Баллистическое проектирование систем космических аппаратов: учебное пособие // СПб.: ВКА имени А.Ф.Можайского. 2007. 86 с.
 18. Рвачев В.Л. Геометрические приложения алгебры логики // Киев: Техника. 1967. 212 с.
 19. Durrieu S., Nelson R.F. Earth observation from space – the issue of environmental sustainability // Space Policy. 2013. vol. 29. no. 4. pp. 238–250.
 20. Барinov К.Н., Мамон П.А. Теория полета космических аппаратов // М.: МО СССР. 1974. 346 с.
 21. Эльясберг П.Э. Введение в теорию полета искусственных спутников Земли // М.: Наука. 1965. 540 с.
 22. Лаврова О.Ю., Митягина М.И., Луляя Е.А. Перспективы российских исследований ДЗЗ // Земля и вселенная. 2015. № 2. С.53–60.
 23. Wickwire K.H. Mathematical models for the control of pest and infectious diseases // Theor. Popul. Biol. 2012. vol. 11. pp.182–238.
 24. Бирюков А.В. Синтез многоцелевых орбитальных структур космических аппаратов ДЗЗ // Труды Международной научно-технической конференции «Перспективные информационные технологии – 2014». 2014. С.441–442.
 25. Маштаков Я.В., Ткачев С.С. Влияние возмущений на точность стабилизации спутника ДЗЗ // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2016. №18. С. 1–31.

26. Официальный сайт NASA. URL: <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/SpacecraftQuery.jsp>. (дата обращения 19.04.2017).
27. Сайт CELESTRAK. URL: <http://celestrak.com/NORAD/elements/supplemental/>. (дата обращения 19.04.2017).

Коваленко Алексей Юрьевич — к-т техн. наук, старший преподаватель кафедры навигационно-баллистического обеспечения применения космических средств и теории полета летательных аппаратов, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского (ВКА им. А.Ф. Можайского). Область научных интересов: экспериментальная баллистика, теория полета космических аппаратов, математическое моделирование. Число научных публикаций — 32. al_nex_239@mail.ru; ул. Ждановская 13, Санкт-Петербург, 197198; р.т.: +7(812) 237-19-60.

A.YU. KOVALENKO
**MATHEMATICAL ASPECTS OF EVALUATING EFFECTIVENESS
 OF THE EARTH'S SURFACE SPACECRAFT**

Kovalenko A.Yu. Mathematical Aspects of Evaluating Effectiveness of the Earth's Surface Spacecraft.

Abstract. This article is devoted to evaluation of the effectiveness of the spacecraft remote sensing of the Earth. The probability of monitoring the spacecraft remote sensing of the specified area is proposed as a generalized indicator of the effectiveness. That probability depends on the probability of the reception of information about the object and the probability of occurrence of data transmission to the point of processing through the channels of satellite communication systems. The probability of obtaining information about an object is determined by the probability of object detection in the area and probability of its identification. The focus is on the estimation of the probability of object detection in a service area. This figure has a geometric meaning, which determines the percentage of the area surface viewed by the spacecraft. The calculation of geometric probability is generally performed using R-functions. The work includes mathematical description of the span and area of service by the final mathematical expressions, on the basis of which correlations to calculate area-based indicators of the viewing areas of the earth's surface were obtained.

Keywords: object detection probability, geometric probability, R-function, remote sensing, effectiveness.

Kovalenko Aleksey Yuryevich — Ph.D., senior lecturer of navigation and ballistic support of the use of space assets and the theory of the flight of aircraft department, Mozhaisky Military Space Academy. Research interests: experimental ballistics, theory of flight spacecraft, mathematical modeling. The number of publications — 32. al_nex_239@mail.ru; 13, Zhdanovskaya street, St.-Petersburg, 197198, Russia; office phone: +7(812) 237-19-60.

References

1. Sviridov K.N. [On the limit resolution aerospace remote sensing systems of the Earth]. *Raketno-kosmicheskoe priborostroenie i informacionnye sistemy – Rocket-space instrument making and information systems*. 2014. vol. 1. no. 1. pp. 34–40. (In Russ.).
2. Stratilatova N.N., Kurenkov V.I., Kucherov A.S., Egorov A.S. [Methodology comparative evaluation of the effectiveness of spacecraft remote sensing of the Earth with a variety of optic-electronic telescopic complexes]. *Vestnik samarskogo gosudarstvennogo aehrokosmicheskogo universiteta im. akademika S.P. Korolyova (nacional'nogo issledovatel'skogo universiteta) – Vestnik of Samara state aerospace University academician S. P. Korolev (national research University)*. 2016. vol. 15. no. 2. pp. 80–89. (In Russ.).
3. Kovalenko A.Ju. [Ballistic design of heterogeneous systems of the spacecraft with a given cycle circuit route]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*. 2015. vol. 3(40). pp. 45–54. (In Russ.).
4. *Abchuk V.A. Spravochnik po issledovaniyu operacij* [Handbook on operations research]. M.: Voenizdat. 1979. 368 p. (In Russ.).
5. Volgin D.A. [Space program remote sensing of the Earth and the constellation of spacecraft Russia]. *Nauchnye trudy instituta nepreryvnogo professional'nogo obrazovaniya – Scientific papers of the Institute of continuous professional education*. 2016. vol. 6(6). pp. 211–216. (In Russ.).

6. Gorelov Yu.N. et al. On Optimization Of Attitude Control Programs For Earth Remote Sensing Satellite. *Gyroscopy and Navigation*. 2014. vol. 5. no. 2. pp. 90–97.
7. Gorelov Yu.N., Manturov A.I., Yurin V.E., Pyrinov N.I. Generation Of Satellite Attitude Control Programs For Stereo Imaging. Proceedings of the 22nd Saint-Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS 2015). 2015. pp. 120–122.
8. Kovalenko A.Yu., Mosin D.A., Urtminceva I.A. [The evaluation of the efficiency and service of an arbitrary area of the earth's surface spacecraft in remote sensing for environmental monitoring]. *Ehkologiya i razvitie obshchestva – Environment and development society*. 2015. vol. 4(15). pp. 45–50. (In Russ.).
9. Kovalenko A.Yu., Kubasov I.Yu. [The methods of assessment of efficiency review of spacecraft random areas of the earth's surface]. *Trudy devyatnadcatoj Vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii «Aktual'nye problemy zashchity i bezopasnosti»* [Proceedings of the nineteenth All-Russian scientific-practical conference Actual problems of protection and security]. 2016. Issue 1. pp. 136–139. (In Russ.).
10. Dash J., Ogutu B.O. Recent advances in space-borne optical remote sensing systems for monitoring global terrestrial ecosystems. *Progress In Physical Geography*. 2015. vol. 40. no. 2. pp. 322–351.
11. Sviridov K.N. [On a new approach to the acquisition and processing of remote sensing images distorted by the turbulent atmosphere]. *Raketno-kosmicheskoe priborostroenie i informacionnye sistemy – Rocket-space instrument making and information systems*. 2014. vol. 1. no. 4. pp. 28–36. (In Russ.).
12. Nazmutdinova A.I., Itskov A.G., Milich V.N. Description of the process of presentation and recognition of forest vegetation objects on multispectral space images. *Pattern Recognition And Image Analysis (Advances In Mathematical Theory And Applications)*. 2017. vol. 27. no. 1. pp. 105–109.
13. Han Y., Koike H., Idesawa M. Recognizing objects with multiple configurations. *Pattern analysis & applications*. 2014. vol. 17. no. 1. pp. 195–209.
14. Darnopyh V.V., Malyshev V.V., Usovik I.V. [Multi-objective optimization of the efficiency target of the functioning of the orbital groups of systems for remote sensing of Land-based operational planning]. *Vestnik moskovskogo aviacionnogo instituta – Bulletin of the Moscow aviation Institute*. 2014. vol. 21. no. 5. pp. 37–52. (In Russ.).
15. Laverov N.P., Popovich V.V., Vedeshin L.A., Gal'vano F.R. [Methods of data analysis remote sensing of the Earth]. *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa – Modern problems of remote sensing of the Earth from space*. 2015. vol. 12. no. 6. pp. 145–153. (In Russ.).
16. Reshmin S. A. Properties of the time-optimal control for Lagrangian single-degree-of-freedom systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 2015. vol. 60. no. 12. pp. 350–355.
17. Vlasov S.A., Kul'vic A.V., Kubasov I.Ju., Mosin D.A. *Ballisticheskoe proektirovanie sistem kosmicheskikh apparatov* [Ballistic design of spacecraft systems]. SPb.: VKA imeni A.F.Mozhajskogo. 2007. 86 p. (In Russ.).
18. Rvachev V.L. *Geometricheskie prilozheniya algebry logiki* [Geometric applications of logic algebra]. Kiev: Tekhnika. 1967. 212 p. (In Russ.).
19. Durrieu S., Nelson R.F. Earth observation from space – the issue of environmental sustainability. *Space Policy*. 2013. vol. 29. no. 4. pp. 238–250.
20. Barinov K.N., Mamon P.A. *Teorija poleta kosmicheskikh apparatov* [Theory of flight spacecraft]. M.: MO SSSR. 1974. 346 p. (In Russ.).
21. Jel'jasberg P.Je. *Vvedenie v teoriju poleta iskusstvennyh sputnikov Zemli* [Introduction to the theory of flight of artificial earth satellites]. M.: Nauka. 1965. 540 p. (In Russ.).

22. Lavrova O.Yu., Mityagina M.I., Lupyan E.A. [The prospects for the Russian research remote sensing of the Earth]. *Zemlya i vseennaya – The earth and the universe*. 2015. vol. 2. pp. 53–60. (In Russ.).
23. Wickwire K.H. Mathematical models for the control of pest and infectious diseases // *Theor. Popul. Biol.* 2007. vol. 11. pp. 182–238.
24. Biryukov A.V. [The synthesis of multipurpose orbital structures remote sensing spacecrafts]. *Trudy Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoj konferencii “Perspektivnye informacionnye tekhnologii – 2014”* [Proceedings of the International Scientific and Technical Conference “Advanced information technology”]. 2014. pp. 441–442. (In Russ.).
25. Mashtakov Ya.V., Tkachev S.S. [The effect of perturbations on accuracy of stabilization of the satellite remote sensing]. *Preprinty IPM im. M.V. Keldysha – The Preprint Institute of applied mathematics name M. V. Keldysh*. 2016. vol. 18. pp. 1–31. (In Russ.).
26. Oficial'nyj sajt NASA [Official web site of NASA USA]. Available at: <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/SpacecraftQuery.jsp>. (accessed 19.04.2017).
27. Sajt CELESTRAK [Web site of CELESTRAK]. Available at: <http://celestrak.com/NORAD/elements/supplemental/>. (accessed 19.04.2017).

В. П. БУБНОВ, А. С. ЕРЕМИН, Н. А. КОВРИЖНЫХ, И. В. ОЛЕМСКОЙ СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕИМУЩЕСТВ СТРУКТУРНЫХ МЕТОДОВ ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ ОБЫКНОВЕННЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ

Бубнов В. П., Еремин А. С., Коврижных Н. А., Олемской И. В. Сравнительное исследование преимуществ структурных методов численного решения обыкновенных дифференциальных уравнений.

Аннотация. Рассматриваются вопросы, связанные с тестированием эффективности практической реализации методов решения начальной задачи для обыкновенных дифференциальных уравнений. Анализируется алгоритм, заложенный в программную реализацию метода Дорманда — Принса (процедуры `ode45` — наиболее популярной из входящих в стандартный набор методов MATLAB). Представлены разработанные авторами так называемые структурные методы решения систем уравнений специального вида, которые на одном шаге требуют меньше вычислений, чем метод Дорманда — Принса, используемый в `ode45`. Структурные методы реализованы на базе того же алгоритмического и программного ядра, что лежит в основе `ode45` с целью обеспечения максимально объективного сравнения эффективности работы каждого из рассматриваемых методов. На ряде примеров демонстрируется превосходство полученных процедур над `ode45` по соотношению глобальной погрешности и вычислительных затрат.

Ключевые слова: численные методы, обыкновенные дифференциальные уравнения, вложенные методы, MATLAB, структурные методы, `ode45`.

1. Введение. Разработка новых численных методов в таких достаточно изученных областях, как обыкновенные дифференциальные уравнения, требует сравнения с известными и давно применяемыми методами. Во многих системах научных вычислений, таких как MATLAB, MapleSoft Maple и др., реализованы хорошо зарекомендовавшие себя процедуры. Однако в большинстве случаев они рассчитаны на наиболее общий вид решаемых систем уравнений. В то же время хорошо известно, что использование различных конструктивных подходов позволяет получать методы, обладающие лучшими свойствами по сравнению с ранее построенными «классическими» вариантами. И даже в такой глубоко изученной области, как явные методы типа Рунге — Кутты, ежегодно появляются новые работы. Разрабатываются методы, обладающие специальными геометрическими свойствами [1], имеющие расширенные области устойчивости [2], сохраняющие сильную устойчивость при решении уравнений в частных производных [3] и специально рассчитанные на решение конкретных задач [4]. Наряду с этим совершенствуются и методы общего назначения [5], изучаются способы оценки погрешности и управления длиной шага интегрирования [6, 7].

Для построения этого многообразия методов используются различные подходы. Одним из таких подходов к разработке методов ре-

шения систем обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) является разделение системы на две или более частей и применение к ним разных расчетных схем. Изначально эта техника была применена к жестким задачам, которые можно было разделить на «жесткую» и «нежесткую» компоненты [8]. В настоящее время развивается использование многосхемных методов для разделяемых систем с целью обеспечения симплектичности [9, 10], решения систем уравнений в частных производных [11], лучшей обработки быстрых и медленных процессов в больших системах [12, 13].

Авторы применяют технику разделения систем ОДУ для построения явных схем типа Рунге — Кутты, требующих меньше вычислений, чем «классические» [14, 15]. Этот выигрыш обеспечивается за счет использования структуры системы (см. раздел 3). При этом речь не идет о каких-то особенных правых частях, характерных для специальных задач, а лишь о структуре зависимостей правых частей системы ОДУ вида $y' = f(x, y(x))$, где y и f — векторы одинаковой размерности от искомых функций. Заметим, что в очень многих задачах можно выделить такие структурные особенности. В монографии [16] приводится изложение теории их построения, тонкостей применения и варианты сконструированных методов.

Для демонстрации практической выгоды от использования таких расчетных схем было решено провести их реализацию в среде MATLAB. Успешная практическая реализация численных методов типа Рунге — Кутты решения ОДУ требует построения надежной процедуры управления длиной шага интегрирования, от которой зависит эффективность решения на интервале, покрывающем множество шагов. Поэтому сравнение двух численных методов, представляющих собой расчетные схемы для совершения одного шага по независимой переменной, следует проводить на базе одной и той же управляющей программы. Процедуры MATLAB реализованы с достаточно надежными управляющими алгоритмами, что и обеспечивает их успешность. Поскольку коды математических процедур MATLAB являются открытыми, мы реализуем другие методы, обладающие преимуществом над «классическими» методами Рунге — Кутты при совершении одного шага на основе тех же управляющих программ.

2. Алгоритм решения ОДУ в MATLAB. Наиболее часто используемой процедурой решения ОДУ в MATLAB является `ode45`. Как говорится в официальной документации к MATLAB: «В большинстве случаев следует сначала попытаться решить ОДУ с помощью `ode45`» [17]. Процедура `ode45` является реализацией широко известного метода, предложенного Дормандом и Принсом [18]. Это одношаго-

вый метод Рунге — Кутты, имеющий пятый порядок и использующий для управления длиной шага интегрирования оценку контрольного члена разложения решения в ряд через метод четвертого порядка, «вложенный» в основной. Для начальной задачи:

$$y'(x) = f(x, y(x)), \quad y(x_0) = x_0 \quad (1)$$

находится два приближения:

$$\begin{aligned} y(x_0 + h) &\approx y_0 + h \sum_{i=1}^s b_i k_i, \\ \bar{y}(x_0 + h) &\approx y_0 + h \sum_{i=1}^{\bar{s}} \bar{b}_i k_i, \end{aligned} \quad (2)$$

где значения k_i одинаковы для обоих приближений (поэтому и говорят, что один метод «вложен» в другой):

$$k_i = f \left(x_0 + c_i h, y_0 + \sum_{j=1}^{i-1} a_{ij} k_j \right), \quad i = 1, \dots, \max(s, \bar{s}).$$

Вместе два приближения требуют семь вычислений правой части дифференциального уравнения, однако последний этап текущего шага используется в качестве первого этапа на следующем шаге, так как свобода в выборе коэффициентов дает возможность выполнить равенство $a_{\max(s, \bar{s}), i} = b_i$, $i = 1, \dots, s$. Таким образом, метод на каждом шаге, кроме самого первого, использует лишь шесть новых этапов. Такая технология получила название «Первый как последний» (First Same as Last, FSAL). Конкретные коэффициенты a_{ij} , b_i , \bar{b}_i и c_i метода, используемого в ode45, можно найти в [18]. Мы будем обозначать его в сравнении с другими методами как DP5(4)7F, имя в виду фамилии Дорманда и Принса (DP), порядок метода (5), порядок оценщика в скобках (4), число этапов (7) и использование FSAL (F).

Алгоритм управления длиной шага на основе оценки контрольного члена погрешности (в дальнейшем будем называть его «погрешностью») заключается в ode45 в следующем. Производится сравнение нормы относительной «погрешности» err с заданным допуском tol . В случае превышения допуска полученное приближение к решению не принимается и задача еще раз решается из той же точки с меньшим

шагом; иначе — приближение к решению принимается и процедура переходит к новому шагу. В обоих случаях длина нового шага выбирается по формуле:

$$h_{new} = h \min \left(5, \max \left(0.1, 0.8 \left(\frac{err}{tol} \right)^{\frac{1}{5}} \right) \right), \quad (3)$$

то есть уменьшается, если $err > tol$, и наоборот. При этом не допускается слишком сильное увеличение (не больше чем в пять раз) и уменьшение (не больше чем в десять). Обоснование этого есть, например, в [19]. Степень $1/5$ связана с тем, что оценка «погрешности» производится методом четвертого порядка и результирующая величина err пропорциональная пятой степени длины шага. Соответственно, при другом порядке оценщика она будет другой.

Стоит отметить, что алгоритм управления шагом дополнен специальной обработкой ситуации, когда часть из компонентов решения должна быть неотрицательной. Однако мы не станем рассматривать эту особенность в рамках настоящей статьи.

3. Структурные методы. В [20] представлены специальные методы типа Рунге — Кутты решения разделяющихся систем ОДУ вида:

$$\begin{cases} y_1'(x) = f_1(x, y_2(x)), \\ y_2'(x) = f_2(x, y_1(x)), \end{cases} \quad (4)$$

причем $y_1, f_1 \in \mathbb{R}^n$ и $y_2, f_2 \in \mathbb{R}^m$, то есть они могут быть векторами произвольной размерности. Такие системы возникают, например, в задачах небесной механики, физики высоких энергий [20], поиска оптимального стабилизирующего управления [21]. Построенные методы являются естественным обобщением методов Нюстрёма [19] для уравнений второго порядка без зависимости правой части от первой производной решения:

$$y''(x) = f(x, y(x)), \quad (5)$$

которое в виде системы первого порядка представляется как:

$$\begin{cases} y_1'(x) = y_2(x), \\ y_2'(x) = f_2(x, y_1(x)). \end{cases} \quad (6)$$

С использованием того же подхода, что позволил Э. Нюстрёму построить для системы (6) методы, требующие меньше вычислений функции f , чем классические методы Рунге — Кутты, в [16] конструируются методы, обладающие тем же преимуществом, но пригодные для решения систем вида (4). Мы называем их *структурными*, так как они алгоритмически используют особую структуру системы (4) для получения преимущества над классическими методами.

Следует отметить, что в MATLAB нет встроенной реализации методов Рунге — Кутты — Нюстрёма, являющихся прямыми методами решения систем уравнений второго порядка (5). Однако представленные здесь структурные методы более общие, и любая из известных схем Рунге — Кутты — Нюстрёма может быть получена из некоторого структурного метода для системы (4) путем применения его к (6) и записи прямой схемы решения (5). Поэтому отдельно методы Нюстрёма мы не рассматриваем, несмотря на то, что часть выбранных нами тестовых задач допускает их использование.

Применение структурного метода на одном шаге с начальными условиями $y_1(x_0) = y_{10}$, $y_2(x_0) = y_{20}$ и шагом h совершается по формулам:

$$\begin{aligned} y_1(x_0 + h) &\approx y_{10} + h \sum_{i=1}^{s_1} b_{1i} k_{1i}, \\ y_2(x_0 + h) &\approx y_{20} + h \sum_{i=1}^{s_2} b_{2i} k_{2i}, \\ \bar{y}_1(x_0 + h) &\approx y_{10} + h \sum_{i=1}^{s_1} \bar{b}_{1i} k_{1i}, \\ \bar{y}_2(x_0 + h) &\approx y_{20} + h \sum_{i=1}^{s_2} \bar{b}_{2i} k_{2i}, \end{aligned} \quad (7)$$

где пары функций k_{1i} , k_{2i} вычисляются в строгом порядке возрастания i как:

$$\begin{aligned}
 k_{1i} &= f \left(x_0 + c_{1i}h, y_{20} + \sum_{j=1}^{i-1} a_{1ij}k_{2j} \right), \quad i = 1, \dots, s_1, \\
 k_{2i} &= f \left(x_0 + c_{2i}h, y_{10} + \sum_{j=1}^i a_{2ij}k_{1j} \right), \quad i = 1, \dots, s_2,
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

и s_1 равно либо s_2 , либо $s_2 + 1$. В последнем случае k_{1s_1} находится последним. Идея заключается в том, что для двух частей системы уравнения применяются разные (но взаимосвязанные) вычислительные схемы. Вложенные оценщики погрешности применяются аналогично (2), но в формулах мы для простоты считаем s_1 и s_2 общим числом этапов в применяемой паре методов.

Коэффициенты a , b , \bar{b} и c представленной схемы находятся так же, как и для классических методов Рунге — Кутты [19], исходя из системы алгебраических уравнений, обеспечивающей требуемый порядок метода, то есть совпадение рядов Тейлора для точного решения и численного приближения в точке x_0 до определенного порядка h^p . Входящие в эту систему уравнения называются условиями порядка. Количество условий порядка в случае структурного метода для системы (4) вдвое больше, чем для классического метода (1), (2) [16]. Нахождение точного решения (или одного из решений) такой системы, как правило, включает в себя применение упрощающих условий, выявление общих закономерностей во входящих в нее уравнениях, и для порядков от пятого является достаточно трудоемкой задачей.

Еще раз подчеркнем, что в рассматриваемой нами системе (4) не накладывается никаких ограничений на вид правой части, кроме зависимости от искомым функций. Поэтому методы вида (7), (8) не являются разработанными для узких классов моделей со специальными правыми частями, а могут применяться достаточно широко.

4. Методы для сравнения. Для сравнения с методом DP5(4)7F мы выбрали два структурных метода. Первый из них, преобразованный метод из [22], — метод пятого порядка с оценщиком третьего порядка, дающий приближение к решению после одного шага за пять вычислений каждой из компонент вектора правых частей (4), причём пять этапов (используемые только для оценки погрешности) используются в качестве первых на следующем шаге. Таким образом, на один шаг получаем эффективно только четыре

этапа. В силу особенностей именно этого метода k_{21} на новом шаге совпадает с k_{25} на предыдущем только тогда, когда длина шага не меняется. Поскольку подстройка такого поведения изменила бы управляющий алгоритм решения, мы отказались от использования предыдущего k_{25} на новом шаге. Таким образом, метод требует четыре вычисления правой части по первой компоненте и пять по второй на шаг. Обозначим его RKS5(3)5F, где RKS означает *структурный метод Рунге — Кутты*.

Система условий порядка для RKS5(3)5F состоит из 51 уравнения с 44 неизвестными. Ее решение получается с помощью применения техники упрощающих предположений [19], которая специально модифицирована на случай структурных методов.

Построенный в [22] метод является более общим, чем RKS5(3)5F, а последний получается его редуцированием на системы вида (4). Поэтому для удобства приведем параметры RKS5(3)5F в таблице 1 в традиционной форме (так называемой таблице Бутчера) с поправкой на наличие двух связанных схем и их оценщиков:

$$\begin{array}{c|c} c_1 & A_1 \\ \hline & b_1 \\ \hline & \bar{b}_1 \end{array}, \quad \begin{array}{c|c} c_2 & A_2 \\ \hline & b_2 \\ \hline & \bar{b}_2 \end{array}.$$

Здесь $c_1 = (c_{11}, \dots, c_{1s_1})^T$, $A_1 = \{a_{1ij}\}_{i=1, s_1}^{j=1, s_1}$, $b_1 = (b_{11}, \dots, b_{1s_1})$, $\bar{b}_1 = (\bar{b}_{11}, \dots, \bar{b}_{1s_1})$, $c_2 = (c_{21}, \dots, c_{2s_2})^T$, $A_2 = \{a_{2ij}\}_{i=1, s_2}^{j=1, s_2}$, $b_2 = (b_{21}, \dots, b_{2s_2})$, $\bar{b}_2 = (\bar{b}_{21}, \dots, \bar{b}_{2s_2})$. При этом элементы матриц A_1 и A_2 , которые по построению равны нулю, исходя из явности конструируемых методов (a_{1ij} при $j \geq i$ и a_{2ij} при $j > i$) опущены.

Следует отметить, что в [16] кроме RKS5(3)5F также представлен метод пятого порядка с оценщиком четвертого и тем же числом этапов. Однако в силу своих конструктивных особенностей при его применении к системам, имеющим вид (6), оценка погрешности становится невозможна, а некоторые из выбранных нами для тестирования задач имеют именно такой вид (см. раздел 4).

Второй метод — вложенная пара расчетных схем шестого и четвертого порядка RKS6(4)7F. Метод опубликован в [23]. Его пара-

метры для полноты изложения приводятся в таблице 2. Этот метод обладает теми же характеристиками трудозатрат, что и DP5(4)7F: семь этапов по всем компонентам решения и использование FSAL по каждой из них. Однако его важное отличие от DP5(4)7F в том, что основной метод обеспечивает приближение шестого порядка, что, как ожидается, позволит при схожем поведении алгоритма управления шагом и близких длинах шагов при одинаковых требованиях на локальную погрешность получать большую глобальную точность. Конструирование RKS6(4)7F потребовало решения системы из 101 уравнения с 76 неизвестными. После применения упрощающих предположений решение такой системы может быть получено аналитически с шестью свободными параметрами.

Кроме того, для дополнительного исследования эффективности метода RKS6(4)7F мы взяли еще одну вложенную пару методов шестого порядка с оценщиком пятого [24] и реализовали их с тем же управляющим алгоритмом. Они требуют 9 этапов, но также реализуют технологию FSAL, что делает их в наших тестах восьмиэтапными. Мы обозначаем их в тестах как CMR6(5)9F.

5. Тестовые примеры. Для теста были выбраны четыре задачи. Три из них входят в известный набор Detest set [25], четвертая — с известным аналитическим решением — сконструирована специально для демонстрации работы структурных методов.

Пример 1. C5 из [25] — это задача пяти тел, моделирующая движение пяти внешних планет Солнечной системы, находящихся в постоянном гравитационном поле Солнца под действием сил взаимного притяжения.

Каждая из трех координат y_{1j} , y_{2j} и y_{3j} каждого из пяти тел удовлетворяет уравнению ($j = 1, \dots, 5$) (рисунок 1):

$$y_{ij}'' = k_2 \left(- (m_0 + m_j) \frac{y_{ij}}{r_j^3} + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^5 m_k \left[\frac{y_{ik} - y_{ij}}{d_{jk}^3} - \frac{y_{ik}}{r_k^3} \right] \right), \quad (9)$$

где

$$r_j^2 = \sum_{i=1}^3 y_{ij}^2 \quad \text{и} \quad d_{kj}^2 = \sum_{i=1}^3 (y_{ik} - y_{ij})^2, \quad k, j = 1, \dots, 5.$$

Таблица 1. Параметры метода RKS5(3)5F

c_{1i}	a_{1ij}								
0									
$\frac{4}{15} - \frac{\sqrt{6}}{15}$	$\frac{4}{15} - \frac{\sqrt{6}}{15}$								
$\frac{1}{2} - \frac{\sqrt{6}}{8}$	$\frac{9}{32} - \frac{9\sqrt{6}}{128}$	$\frac{7}{32} - \frac{7\sqrt{6}}{128}$							
$\frac{7}{10} + \frac{\sqrt{6}}{20}$	$\frac{4977}{9400} - \frac{4419\sqrt{6}}{18800}$	$\frac{2213}{9400} + \frac{9809\sqrt{6}}{112800}$	$-\frac{61}{940} + \frac{4469\sqrt{6}}{22560}$						
1	0	$\frac{4}{9} - \frac{\sqrt{6}}{36}$	$\frac{4}{9} + \frac{\sqrt{6}}{36}$	$\frac{1}{9}$					
b_{1i}	$\frac{82}{285} + \frac{77\sqrt{6}}{1140}$	$-\frac{297}{1377} - \frac{351\sqrt{6}}{764}$	$\frac{2432}{2415} + \frac{64\sqrt{6}}{250401}$	$\frac{51676\sqrt{6}}{250401} - \frac{18184}{250401}$			0		
\bar{b}_{1i}	$\frac{1}{3}$	$-\frac{2103}{1337} - \frac{117\sqrt{6}}{1337}$	$\frac{296}{483} + \frac{316\sqrt{6}}{483}$	$\frac{5682}{4393} - \frac{7469\sqrt{6}}{13179}$			$\frac{1}{3}$		
c_{2i}	a_{2ij}								
$\frac{2}{15} - \frac{\sqrt{6}}{30}$	$\frac{2}{15} - \frac{\sqrt{6}}{30}$								
$\frac{2}{5} - \frac{\sqrt{6}}{10}$	$\frac{1}{10} - \frac{\sqrt{6}}{40}$	$\frac{3}{10} - \frac{3\sqrt{6}}{10}$							
$\frac{2}{5} + \frac{\sqrt{6}}{10}$	$\frac{1337}{1250} - \frac{1947\sqrt{6}}{5000}$	$-\frac{4551}{1750} - \frac{1083\sqrt{6}}{1000}$	$\frac{8448}{4375} + \frac{496\sqrt{6}}{625}$						
1	$-\frac{103}{38} - \frac{83\sqrt{6}}{76}$	$\frac{2901}{382} + \frac{11721\sqrt{6}}{5348}$	$-\frac{72}{23} - \frac{272\sqrt{6}}{161}$	$-\frac{62874}{83467} + \frac{49236\sqrt{6}}{83467}$					
$\frac{17}{15} - \frac{\sqrt{6}}{30}$	$\frac{82}{285} + \frac{77\sqrt{6}}{1140}$	$-\frac{297}{1377} - \frac{351\sqrt{6}}{764}$	$\frac{2432}{2415} + \frac{64\sqrt{6}}{250401}$	$\frac{51676\sqrt{6}}{250401} - \frac{18184}{250401}$	$\frac{2}{15} - \frac{\sqrt{6}}{30}$				
b_{2i}	0	$\frac{4}{9} - \frac{\sqrt{6}}{36}$	$\frac{4}{9} + \frac{\sqrt{6}}{36}$	$\frac{1}{9}$			0		
\bar{b}_{2i}	$\frac{1}{46} - \frac{\sqrt{6}}{23}$	$\frac{55}{138} + \frac{5\sqrt{6}}{138}$	$\frac{55}{138} + \frac{5\sqrt{6}}{138}$	$\frac{14}{69} - \frac{5\sqrt{6}}{69}$	$\frac{\sqrt{6}}{23} - \frac{1}{46}$				

Таблица 2. Параметры метода РКS6(4)7F

c_{li}	a_{lij}									
0										
1	1									
10	10									
1	1		3							
5	20		20							
7	3787		18375	25137						
16	16384		32768	32768						
677	75661258001		1876243893	159015217581	132486575859					
1130	815236805000		13043788880	326094722000	815236805000					
51	7359721413		5303126523	290275578153	242563241439	365681475				
56	289103449600		26647773320	842170918400	1518421596160	2011154432				
1	941		0	13851	8019	4302592	491			
	13800			42280	26800	17451825	8400			
b_{li}	85565		0	3135875	1982464	4606087948250	3519520256			0
	1450134			10231386	30895767	13193789408019	15909379569			
\bar{b}_{li}	5291627		0	19442425	32215040	387922858450	0			784
	52915674			95681454	361616493	830159992167	0			5583

Таблица 2 (продолжение). Параметры метода RK56(4)7F

c_{2i}	a_{2ij}											
0	0											
$\frac{2}{15}$	$\frac{2}{45}$	$\frac{4}{45}$										
$\frac{2}{9}$	$\frac{209}{1296}$	$\frac{1}{8}$	$\frac{241}{1296}$									
$\frac{5}{9}$	$\frac{49625}{199584}$	$\frac{95}{176}$	$\frac{11665}{180576}$	$\frac{23680}{118503}$								
$\frac{23}{28}$	$\frac{10435142297}{23302838272}$	$\frac{318573}{351232}$	$\frac{46277003099}{42135898112}$	$\frac{572527523}{933091026}$	$\frac{109118472393775}{137093718470016}$							
1	$\frac{276853621}{542488224}$	$\frac{13851}{7856}$	$\frac{4409622831}{2435689952}$	$\frac{1576614784}{722372457}$	$\frac{189008540982800}{196307593919313}$	$\frac{879880064000}{2603835122793}$						
1	$\frac{85565}{1450134}$	0	$\frac{3135875}{10231386}$	$\frac{1982464}{30895767}$	$\frac{4606087948250}{13193789408019}$	$\frac{3519520256}{15909379569}$						
b_{2i}	$\frac{941}{13800}$	0	$\frac{13851}{42280}$	$\frac{8019}{26800}$	$\frac{4302592}{17451825}$	$\frac{491}{8400}$	0					
\bar{b}_{2i}	$\frac{1}{12}$	0	$\frac{171}{604}$	$\frac{99}{268}$	$\frac{5488}{30351}$	0	$\frac{1}{12}$					

Получаем систему с тридцатью неизвестными функциями. Начальные данные для положений и скоростей всех планет и нормированные физические величины (массы планет и солнца и гравитационная постоянная k_2) приведены в [25].

Решение проводится на интервале $[0, 20]$. В качестве «эталонного» решения для определения глобальной погрешности берется расчет процедурой ode45 при максимальных настройках относительной локальной точности.

Пример 2. D1 из [25] — это задача плоского движения тела по эллиптической орбите в центральном поле тяготения:

$$\begin{aligned} x'' &= -\frac{x}{(x^2 + y^2)^3}, x(0) = 1 - \varepsilon, x'(0) = 0, \\ y'' &= -\frac{y}{(x^2 + y^2)^3}, y(0) = 0, y'(0) = \sqrt{\frac{1 + \varepsilon}{1 - \varepsilon}}, \end{aligned} \quad (10)$$

с решением:

$$\begin{aligned} x &= \cos u - \varepsilon, x' = -\frac{\sin u}{1 - \varepsilon \cos u}, u - \varepsilon \sin u - t = 0, \\ y &= \sqrt{1 - \varepsilon^2} \sin u, y' = \frac{\sqrt{1 - \varepsilon^2} \cos u}{1 - \varepsilon \cos u}. \end{aligned}$$

Эксцентриситет орбиты ε влияет на «жесткость» задачи. Все рассматриваемые нами методы явные и потому цели применения их к действительно жестким задачам не стоит, но для проверки того, как ведут себя алгоритмы при приближении задачи к жесткой, мы взяли два значения $\varepsilon = 0.3$ и $\varepsilon = 0.7$. Интегрирование так же проводим на отрезке $[0, 20]$.

Пример 3. E3 из [25] — уравнение, описывающее осциллятор Дуффинга:

$$y'' + y - \frac{y^3}{6} = 2 \sin(2.78535x), y(0) = y'(0) = 0. \quad (11)$$

Здесь, как и в примере 1, в качестве «эталонного» решения для определения глобальной погрешности берем решение с помощью ode45 при максимальных настройках относительной локальной точности. Отрезок интегрирования — $[0, 20]$.

Пример 4. Задача, в которой первая и вторая группы представления (4) содержат по два уравнения:

$$\begin{cases} y_1' = -x \ln y_3 \exp(y_4 - 1), \\ y_2' = -2x \left(y_4 + \sqrt{\ln(y_3)} \right), \\ y_3' = 4xy_1^2 \ln(y_1 + 1) \exp(2 - 2y_2), \\ y_4' = 2x(y_2 - \ln(y_1) - 1). \end{cases} \quad (12)$$

Ее точное решение для начальных условий:

$$y_1(0) = y_2(0) = y_3(0) = y_4(0) = 1$$

есть:

$$y_1 = e^{\cos x^2 - 1}, \quad y_2 = \cos x^2 - \sin x^2, \quad y_3 = e^{2\sin x^2}, \quad y_4 = \cos x^2.$$

Мы решаем эту задачу на отрезке $[0, 5]$.

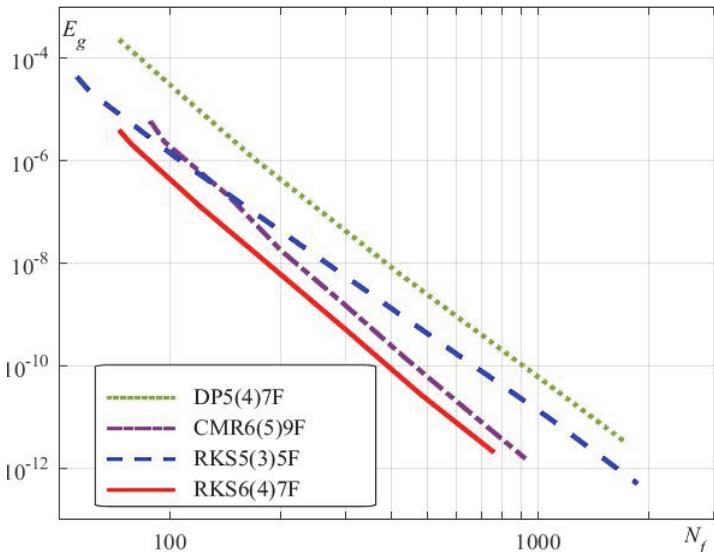


Рис. 1. Результаты теста для задачи (9)

6. Результаты сравнения. Критерием эффективности применения методов служило соотношение между количеством вычислений правой части системы ОДУ N_f и достигаемой абсолютной глобальной погрешностью решения E_g . В силу того, что применялись методы разных порядков при одних и тех же требованиях на локальную погрешность, они решали с порой сильно различающимися длинами шагов. Однако в силу разной стоимости одного шага общие затраты могли быть ниже даже при большем числе шагов. При этом в N_f учитываются и вычисления на отброшенных шагах, на которых погрешность была выше допустимого значения.

Мы приводим графики в двойной логарифмической шкале. Чем ниже и левее на графике изображена кривая, тем эффективнее метод, то есть тем ниже глобальная погрешность при том же количестве вычислений.

На рисунке 1 приводятся графики поведения методов при решении примера 1. Как видно, в данном случае структурные методы существенно выигрывают у «классических» методов тех же порядков, несмотря на то, что оценка погрешности ведется с помощью методов других порядков. Метод же RKS6(4)7F при тех же затратах на шаг, что и DP5(4)7F, требует примерно вдвое меньше вычислений для обеспечения той же глобальной точности.

Задача из примера 2 показывает худшее поведение метода RKS5(3)5F, чем у DP5(4)7F. Причиной может быть то, что в силу своих конструктивных особенностей структурные методы более чувствительны к неточности в оценке погрешности и к жесткости задачи. Не стоит забывать, что в обоих структурных методах, используемых нами, оценщики погрешности имеют порядок на 2 меньший, чем основные методы (то есть оценка ведется меньшим порядком по сравнению с конкурентами того же порядка), что влияет на алгоритм управления шагом. Тем не менее при малой жесткости (эксцентриситет орбиты 0.3, рисунок 2) RKS6(5)7F оказывается примерно на треть экономичнее CMR6(5)9F. При большей жесткости $\varepsilon = 0.7$ (рисунок 3) поведение обоих методов шестого порядка в целом совпадает, но кривая для RKS6(5)7F раньше начинает менять наклон, что связано с вычислительной погрешностью. Дело в том, что структурные методы численно несколько менее устойчивы и обладают более узким интервалом длин шагов, на которых обеспечивается хорошая оценка погрешности. Однако все это сказывается только на достаточно

высоких требованиях на относительную локальную погрешность и не является критичным для успешного применения структурных методов.

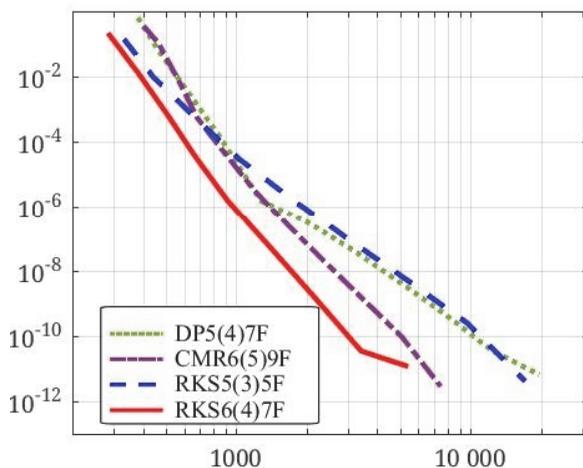


Рис. 2. Результаты теста для системы (10) с $\varepsilon = 0.3$

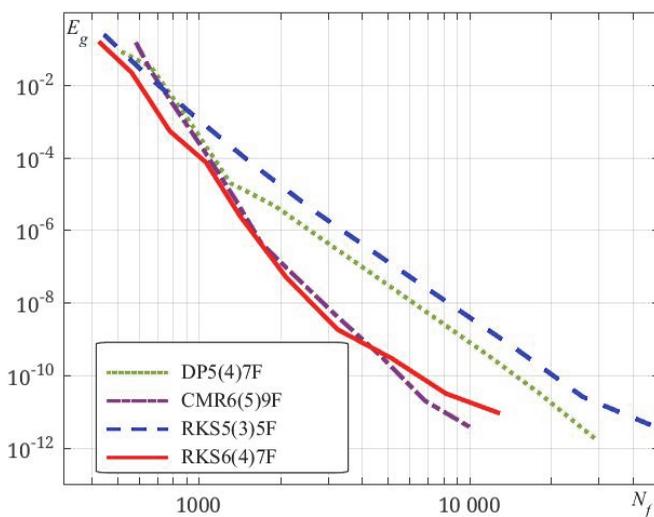


Рис. 3. Результаты теста для системы (10) с $\varepsilon = 0.7$

Примеры 3 и 4 (рисунки 4 и 5) так же показывают, что оба структурных метода не менее, а в большинстве случаев более эффективны, чем их оппоненты тех же порядков.

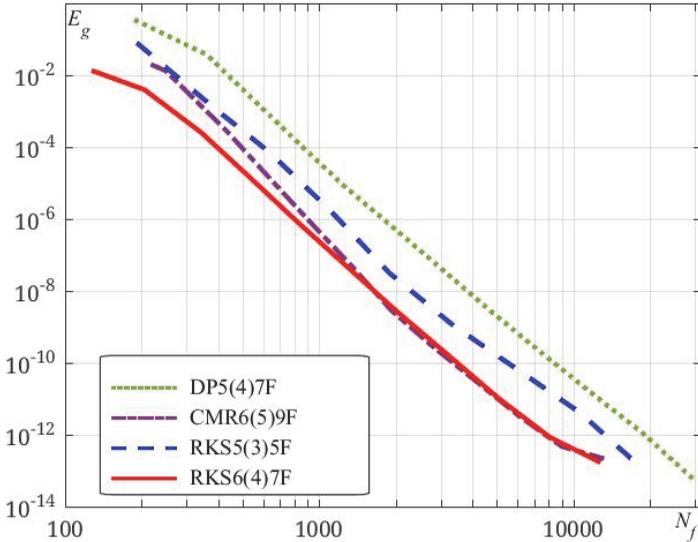


Рис. 4. Результаты теста для уравнения (11)

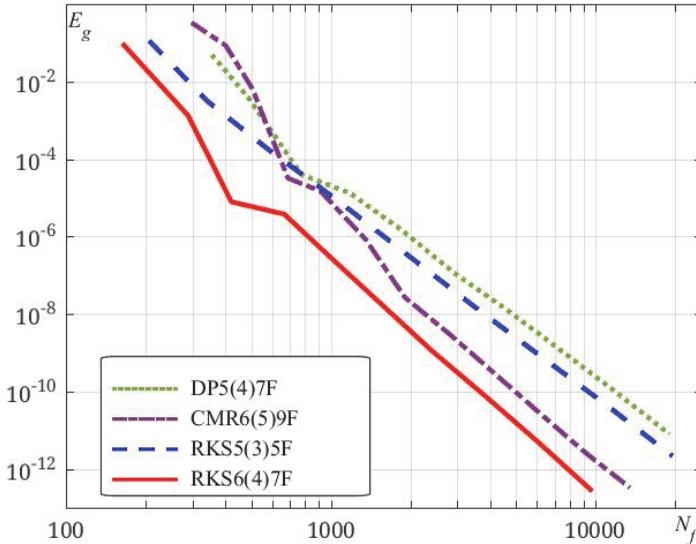


Рис. 5. Результаты теста для системы (12)

7. Заключение. Само собой, классические численные методы решения обыкновенных дифференциальных уравнений, применимые к системам наиболее общего вида, удобны именно в силу своей универсальности. Однако для большинства примеров представленное сравнение демонстрирует лучшее соотношение глобальной точности и затрат у предложенных структурных методов. При этом системы, вид которых позволяет использовать структурные методы, достаточно распространены и могут встретиться в любых приложениях, так как используемая особенность структуры не является характеристикой той или иной предметной задачи, а отражает математические свойства системы уравнений.

Конечно, на стадии реализации новых методов и подготовки системы (выбора порядка нумерации уравнений) к применению структурных методов придется затратить больше усилий, чем при использовании входящих в базу MATLAB процедур. Но выигрыш во времени на этапе расчетов может оказаться куда больше. Поэтому окончательное решение о применении новых методов нужно принимать в зависимости от задачи.

Литература

1. *Kalogiratou Z. et al.* Runge–Kutta type methods with special properties for the numerical integration of ordinary differential equations // *Phys. Rep.* 2014. vol. 536. no. 3. pp. 75–146.
2. *Niegemann J., Diehl R., Busch K.* Efficient low-storage Runge–Kutta schemes with optimized stability regions // *J. Comp. Phys.* 2012. vol. 231. no. 2. pp. 364–372.
3. *Hadjimichael Y. et al.* SSP ERKs of Maximal Effective Order // *SIAM J. Numer. Anal.* 2013. vol. 51. no. 4. pp. 2149–2165.
4. *Kosti A.A., Anastassi Z.A., Simos T.E.* An optimized explicit Runge–Kutta–Nyström method for the numerical solution of orbital and related periodical initial value problems // *Comput. Phys. Comm.* 2012. vol. 183. no. 3. pp. 470–479.
5. *Nassif N.R., Makhoul-Karam N., Erhel J.* A globally adaptive explicit numerical method for exploding systems of ordinary differential equations // *Appl. Numer. Math.* 2013. vol. 67. pp. 204–219.
6. *Balac S., Mahé F.* Embedded Runge–Kutta scheme for step-size control in the interaction picture method // *Comput. Phys. Comm.* 2013. vol. 184. no. 4. pp. 1211–1219.
7. *Kulikov G.Yu.* Cheap global error estimation in some Runge–Kutta pairs // *IMA J Numer Anal.* 2013. vol. 33. no. 1. pp. 136–163.
8. *Hofer E.* A partially implicit method for large stiff systems of ODEs with only few equations introducing small time-constants // *SIAM J. Numer. Anal.* 1976. vol. 13. no. 5. pp. 645–663.
9. *McLachlan R.L., Ryland B.N., Sun Y.* High order multisymplectic Runge–Kutta methods // *SIAM J. Sci. Comput.* 2014. vol. 36. no. 5. pp. A2199–A2226.
10. *Wang D., Xiao A., Li X.* Parametric symplectic partitioned Runge–Kutta methods with energy-preserving properties for Hamiltonian systems // *Comput. Phys. Comm.* 2013. vol. 184. no. 2. pp. 303–310.
11. *Ketcheson D.I., MacDonald C.B., Ruuth S.J.* Spatially partitioned embedded Runge–Kutta methods // *SIAM J. Numer. Anal.* 2013. vol. 51. no. 5. pp. 2887–2910.
12. *Sandu A., Günther M.* A generalized-structure approach to additive Runge–Kutta methods // *SIAM J. Numer. Anal.* 2015. vol. 53. no. 1. pp. 17–42.

13. *Günther M., Sandu A.* Multirate generalized additive Runge–Kutta methods // *Numerische Mathematik*. 2016. vol. 133. no. 3. pp. 497–524.
14. *Еремин А. С., Олемской И. В.* Вложенный метод интегрирования систем структурно разделенных обыкновенных дифференциальных уравнений // *Ж. вычисл. матем. и матем. физ.* 2010. Т. 50. № 3. С. 434–448.
15. *Olemskoy I.V., Eremin A.S.* An embedded fourth order method for solving structurally partitioned systems of ordinary differential equations // *Appl. Math. Sci.* 2015. vol. 9. no. 97. pp. 4843–4852.
16. *Олемской И. В.* Методы интегрирования систем структурно разделенных дифференциальных уравнений // СПб: СПбГУ. 2009. 179 с.
17. Документация по MATLAB на официальном сайте. Раздел Choose an ODE Solver. URL: <https://www.mathworks.com/help/Matlab/math/choose-an-ode-solver.html> (дата обращения: 14.12.2016).
18. *Dormand J.R., Prince P.J.* A family of embedded Runge–Kutta formulae // *J. Comp. Appl. Math.* 1980. vol. 6. no. 1. pp. 19–26.
19. *Хайрер Э., Нёрссетт С. П., Ваннер Г.* Решение обыкновенных дифференциальных уравнений. Нежесткие задачи // М.: Мир. 1990. Том 1. 512 с.
20. *Овсянников Д. А., Егоров Н. В.* Математическое моделирование систем формирования электронных и ионных пучков // СПб: Изд-во СПбГУ. 1998. 276 с.
21. *Кватко А. Н.* Об одном методе решения граничной задачи для нелинейной управляемой системы в классе дискретных управлений // *Дифференциальные уравнения*. 2008. Т. 44. № 11. С. 1499–1509.
22. *Олемской И. В.* Вложенный пятиэтапный метод пятого порядка типа Дормана–Принса // *Ж. вычисл. матем. и матем. физ.* 2005. Т. 45. № 7. С. 1181–1191.
23. *Olemskoy I.V., Eremin A.S., Kovrizhnykh N.A.* Embedded methods of order six for special systems of ordinary differential equations // *Appl. Math. Sci.* 2017. vol. 11. no. 1. pp. 31–38.
24. *Calvo M., Montijano J.I., Randež L.* A new embedded pair of Runge–Kutta formulas of orders 5 and 6 // *Comput. & Math. with Appl.* 1990. vol. 20. no. 1. pp. 15–24.
25. *Hull T.E. et al.* Comparing numerical methods for ordinary differential equations // *SIAM J. Numer. Anal.* 1972. vol. 9. no. 4. pp. 603–637.

Бубнов Владимир Петрович — д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры информационных и вычислительных систем факультета автоматизации и интеллектуальных технологий, Петербургский государственный университет путей сообщения императора Александра I (ПУУПС). Область научных интересов: вероятностные модели аппаратно-программных комплексов, марковские процессы, дифференциальные уравнения. Число научных публикаций — 162. bubnov1950@yandex.ru, <http://www.pgups.ru>; Московский пр., 9, Санкт-Петербург, 190031; р.т.: +79052807904, Факс: +7(812)457-8606.

Еремин Алексей Сергеевич — доцент кафедры информационных систем факультета автоматизации и интеллектуальных технологий, Санкт-Петербургский государственный университет (СПбГУ). Область научных интересов: численные методы решения дифференциальных уравнений, уравнения с запаздывающим аргументом, вероятностные модели. Число научных публикаций — 23. ereminh@gmail.com, <http://www.spbu.ru>; Университетский пр. 35, Петергоф, Санкт-Петербург, 198504; р.т.: +7(812)428-7159, Факс: +7(812)428-7159.

Коврижных Николай Александрович — аспирант кафедры информационных систем факультета прикладной математики — процессов управления, Санкт-Петербургский государственный университет (СПбГУ). Область научных интересов: численные методы решения дифференциальных уравнений, методы оптимизации. Число научных публика-

ций — 2. sagoyewatha@mail.ru, <http://www.spbu.ru>; Университетский пр. 35, Петергоф, Санкт-Петербург, 198504; р.т.: +7(812)428-7159, Факс: +7(812)428-7159.

Олемской Игорь Владимирович — д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры информационных систем факультета прикладной математики — процессов управления, Санкт-Петербургский государственный университет (СПбГУ). Область научных интересов: численные методы решения систем обыкновенных уравнений, дискретная математика. Число научных публикаций — 56. i.olemskoj@spbu.ru, <http://www.spbu.ru>; Университетский пр. 35, Петергоф, Санкт-Петербург, 198504; р.т.: +7(812)428-7159, Факс: +7(812)428-7159.

V.P. BUBNOV, A.S. EREMIN, N.A. KOVRIZHNYKH, I.V. OLEMSKOY
**COMPARATIVE STUDY OF THE ADVANTAGES OF
 STRUCTURAL NUMERICAL INTEGRATION METHODS FOR
 ORDINARY DIFFERENTIAL EQUATIONS**

Bubnov V.P., Eremin A.S., Kovrizhnykh N.A., Olemskoy I.V. Comparative Study of the Advantages of Structural Numerical Integration Methods for Ordinary Differential Equations.

Abstract. Effectiveness of practical implementation of integration methods for ordinary differential equations is studied. The algorithm implemented in program realization of Dormand–Prince method (one of the most popular MATLAB built-in integration procedure «ode45») is analyzed. The structural methods for partitioned systems of ordinary differential equations are presented. They demand fewer computations for a single step than the Dormand–Prince method used in ode45. Structural methods are implemented on the basis of the same algorithmic and programming core as ode45 to provide more objective comparison of the considered methods’ effectiveness. For several test problems better performance (in global error to computational cost ratio) of the considered structural methods than of «classical» Runge–Kutta methods is demonstrated.

Keywords: numerical integration, ordinary differential equations, MATLAB, embedded methods, structural methods, ode45.

Bubnov Vladimir Petrovich — Ph.D., Dr. Sci., associate professor, professor of informatics and computer systems department, Petersburg state transport university. Research interests: probabilistic models of hardware and software complexes, Markovian processes, differential equations. The number of publications — 162. bubnov1950@yandex.ru, <http://www.pgups.ru>; 9, Moskovsky pr., Saint-Petersburg, 190031, Russia; office phone: +79052807904, Fax: +7(812)457-8606.

Eremin Alexey Sergeevich — Ph.D., associate professor of information systems department of the applied mathematics and control processes faculty, Saint-Petersburg State University. Research interests: numerical solution of differential equations, delay differential equations, probabilistic models. The number of publications — 23. ereminh@gmail.com, <http://www.spbu.ru>; 35, Universitetskii prospekt, Peterhof, Saint-Petersburg, 198504, Russia; office phone: +7(812)428-7159, Fax: +7(812)428-7159.

Kovrizhnykh Nikolai Aleksandrovich — Ph.D. student of information systems department of the applied mathematics and control processes faculty, Saint-Petersburg State University. Research interests: numerical solution of differential equations, delay differential equations, methods of optimization. The number of publications — 2. sagoyewatha@mail.ru, <http://www.spbu.ru>; 35, Universitetskii prospekt, Peterhof, Saint-Petersburg, 198504, Russia; office phone: +7(812)428-7159, Fax: +7(812)428-7159.

Olemskoy Igor Vladimirovich — Ph.D., Dr. Sci., professor of information systems department of the applied mathematics and control processes faculty, Saint-Petersburg State University. Research interests: numerical solution of differential equations, discrete mathematics. The number of publications — 56. i.olemskoy@spbu.ru, <http://www.spbu.ru>; 35, Universitetskii prospekt, Peterhof, Saint-Petersburg, 198504, Russia; office phone: +7(812)428-7159, Fax: +7(812)428-7159.

References

1. Kalogiratos Z. et al. Runge–Kutta type methods with special properties for the numerical integration of ordinary differential equations. *Phys. Rep.* 2014. vol. 536. no. 3. pp. 75–146.
2. Niegemann J., Diehl R., Busch K. Efficient low-storage Runge–Kutta schemes with optimized stability regions. *J. Comp. Phys.* 2012. vol. 231. no. 2. pp. 364–372.
3. Hadjimichael Y. et al. SSP ERKs of Maximal Effective Order. *SIAM J. Numer. Anal.* 2013. vol. 51. no. 4. pp. 2149–2165.
4. Kostı A.A., Anastassi Z.A., Simos T.E. An optimized explicit Runge–Kutta–Nyström method for the numerical solution of orbital and related periodical initial value problems. *Comput. Phys. Comm.* 2012. vol. 183. no. 3. pp. 470–479.
5. Nassif N.R., Makhoul-Karam N., Erhel J. A globally adaptive explicit numerical method for exploding systems of ordinary differential equations. *Appl. Numer. Math.* 2013. vol. 67. pp. 204–219.
6. Balac S., Mahé F. Embedded Runge–Kutta scheme for step-size control in the interaction picture method. *Comput. Phys. Comm.* 2013. vol. 184. no. 4, pp. 1211–1219.
7. Kulikov G.Yu. Cheap global error estimation in some Runge–Kutta pairs. *IMA J Numer Anal.* 2013. vol. 33. no. 1. pp. 136–163.
8. Hofer E. A partially implicit method for large stiff systems of ODEs with only few equations introducing small time-constants. *SIAM J. Numer. Anal.* 1976. vol. 13. no. 5. pp. 645–663.
9. McLachlan R.I., Ryland B.N., Sun Y. High order multisymplectic Runge–Kutta methods. *SIAM J. Sci. Comput.* 2014. vol. 36. no. 5. pp. A2199–A2226.
10. Wang D., Xiao A., Li X. Parametric symplectic partitioned Runge–Kutta methods with energy-preserving properties for Hamiltonian systems. *Comput. Phys. Comm.* 2013. vol. 184. no. 2. pp. 303–310.
11. Ketcheson D.I., MacDonald C.B., Ruuth S.J. Spatially partitioned embedded Runge–Kutta methods. *SIAM J. Numer. Anal.* 2013. vol. 51. no. 5. pp. 2887–2910.
12. Sandu A., Günther M. A generalized-structure approach to additive Runge–Kutta methods. *SIAM J. Numer. Anal.* 2015. vol. 53. no. 1. pp. 17–42.
13. Günther M., Sandu A. Multirate generalized additive Runge–Kutta methods. *Numerische Mathematik.* 2016. vol. 133. no. 3. pp. 497–524.
14. Eremin A.S., Olemskoy I.V. [An embedded method for integrating systems of structurally separated ordinary differential equations]. *Zhurnal vychislitel'noj matematiki i matematicheskoy fiziki – Computational Mathematics and Mathematical Physics.* 2005. vol. 50. no. 3. pp. 414–417. (In Russ.).
15. Olemskoy I.V., Eremin A.S. An embedded fourth order method for solving structurally partitioned systems of ordinary differential equations. *Appl. Math. Sci.* 2015. vol. 9. no. 97. pp. 4843–4852.
16. Olemskoy I.V. *Metody integrirvaniya sistem strukturno razdelennykh differentsialnykh uravnenii* [Integration of structurally partitioned systems of differential equation]. SPb: SPbSU. 2009. 179 p. (In Russ.)
17. Dokumentacija po MATLAB na oficial'nom sajte. Razdel Choose an ODE Solver [Official MATLAB website documentation. Choose an ODE Solver]. URL: <https://www.mathworks.com/help/Matlab/math/choose-an-ode-solver.html> (accessed: 14.12.2016).
18. Dormand J.R., Prince P.J. A family of embedded Runge-Kutta formulae. *J. Comp. Appl. Math.* 1980. vol. 6. no. 1. pp. 19–26.
19. Hairer E., Nørsett S. P., Wanner G. Solving ordinary differential equations I. Nonstiff problems. 2.ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2008. 528 p. (Russ. ed.: Hajrer

- Je., Njorsett S. P., Vanner G. *Reshenie obyknovennyh differencial'nyh uravnenij. Nezhjostkie zadachi*. M.: Mir, 1990. Issue 1. 512 p.).
20. Ovsyannikov D.A., Egorov N.V. *Matematicheskoe modelirovanie sistem formirovaniya elektronnykh i ionnykh puchkov* [Mathematical modelling of electron and ion beam-forming systems]. SPb: SPbSU. 1998. 276 p. (In Russ.).
 21. Kvitko A.N. A method for solving boundary value problems for nonlinear control systems in the class of discrete controls. *Differencial'nye uravnenija – Differential Equations*. 2008. vol. 44. no. 11. pp. 1559–1570. (In Russ.).
 22. Olemskoy I.V. [A fifth-order five-stage embedded method of the Dormand–Prince type]. *Zhurnal vychislitel'noj matematiki i matematicheskoy fiziki – Computational Mathematics and Mathematical Physics*. 2005. vol. 45. no. 7. pp. 1140–1150. (In Russ.).
 23. Olemskoy I.V., Eremin A.S., Kovrizhnykh N.A. Embedded methods of order six for special systems of ordinary differential equations. *Appl. Math. Sci.* 2017. vol. 11. no. 1. pp. 31–38.
 24. Calvo M., Montijano J.I., Rande L. A new embedded pair of Runge–Kutta formulas of orders 5 and 6. *Comput. & Math. with Appl.* 1990. vol. 20. no. 1. pp. 15–24.
 25. Hull T.E. et al. Comparing numerical methods for ordinary differential equations. *SIAM J. Numer. Anal.* 1972. vol. 9. no. 4. pp. 603–637.

А.А. АБДУЛЛИН, В.Н. ДРОЗДОВ, А.Г. МАМАТОВ
**ВЛИЯНИЕ НУЛЕЙ ПЕРЕДАТОЧНОЙ ФУНКЦИИ ОБЪЕКТА
НА СВОЙСТВА РЕГУЛЯТОРА**

Абдуллин А.А., Дроздов В.Н., Маматов А.Г. Влияние нулей передаточной функции объекта на свойства регулятора.

Аннотация. Настоящая работа посвящена исследованию влияния нулей передаточной функции на свойства регуляторов состояния. В настоящее время при проектировании регуляторов с использованием алгоритмов модального управления наибольшее внимание уделяется выбору желаемого распределения полюсов объекта управления. При наличии нулей передаточной функции, близких к полюсам, объект управления стремится к вырождению, что проявляется в ослаблении влияния входных управляющих сигналов на выходные сигналы. При расчете регуляторов состояния это приводит к появлению чрезмерно больших коэффициентов регулятора, чувствительных к изменению параметров объекта и снижению параметрической робастности системы управления. Существующие методы анализа математической модели объекта сводятся к количественной оценке характеристик управляемости и наблюдаемости или редукции объекта управления. Перечисленные методы обладают рядом недостатков, таких как зависимость от базиса в пространстве состояний, игнорирование части модели объекта управления. В настоящей работе для проведения анализа свойств математической модели используется инвариантная по отношению к базису характеристика объекта — матрица вырожденности. В результате исследования установлено, что коэффициенты регулятора состояния обратно пропорциональны определителю матрицы вырожденности объекта управления, определитель матрицы вырожденности равен результату полиномов передаточной функции и его величина зависит от расположения нулей передаточной функции. Предложен способ декомпозиции модели объекта управления с использованием вычетов передаточной функции. В результате преобразования полюсов, которые вызывают появление больших коэффициентов регуляторов, выделяются в виде структурной помехи в составе объекта. Проектирование систем управления для подобного представления объекта может быть реализовано с использованием теории робастного управления.

Ключевые слова: нули передаточной функции, модальное управление, регулятор состояния, вырожденность объекта, ганкелева матрица, результат полиномов, вычет функции, мультипликативная неопределенность.

1. Введение. В последние десятилетия применение алгоритмов модального управления в проектировании систем автоматического управления стало общепринятой практикой. Основной проблемой, возникающей при разработке регуляторов состояния, является выбор желаемых собственных чисел замкнутой системы, обеспечивающих требуемые показатели качества функционирования проектируемой системы управления [1-3]. Распространенными методами выбора желаемых собственных чисел являются использование корней стандартных полиномов (Баттерворта, Бесселя, Чебышева) [3-4], определение областей расположения собственных чисел на комплексной плоскости, в зависимости от требуемых показателей качества [3, 5-6], применение

мер модального доминирования [7-8]. Методы теории модального управления позволяют обеспечить любой желаемый набор собственных чисел в замкнутой системе управления, однако использование стандартных методов назначения собственных чисел зачастую приводит к неудовлетворительным свойствам разработанного регулятора, в частности, к высокой чувствительности коэффициентов регулятора к параметрам объекта, что приводит к снижению параметрической робастности системы управления [7, 9]. В связи с этим возникает необходимость предварительного структурного анализа математической модели объекта управления. Было установлено, что зачастую проблема появления чрезмерно больших по модулю коэффициентов регулятора появляется в тех случаях, когда объект управления имеет нули передаточной функции, в частности, при проектировании прецизионных безредукторных электроприводов [10]. Отсюда вытекает необходимость при анализе математической модели объекта управления учитывать не только полюса, но и нули передаточной функции объекта управления.

Проблемы структурного анализа математических моделей при разработке регуляторов состояния рассмотрены в ряде современных исследований. В [7] при назначении желаемых корней характеристического уравнения предлагается руководствоваться вводимыми в работе мерами модального доминирования. В работах [11-15] обсуждается возможность использования количественных мер управляемости и наблюдаемости объектов управления для выбора желаемых собственных чисел замкнутой системы. Предлагаемые количественные меры базируются на использовании каких-либо числовых характеристиках матриц управляемости и наблюдаемости, либо грамианов управляемости и наблюдаемости. В работах [14-15] предлагается реструктуризация и смена базиса математической модели объекта в зависимости от грамианов управляемости и наблюдаемости. Использование мер модального доминирования, а также различных численных характеристик управляемости и наблюдаемости зачастую не обеспечивает положительных результатов по причине их зависимости от выбора базиса в пространстве состояний и игнорировании нулей передаточной функции [10].

Значительное распространение при синтезе регуляторов состояния при условии наличия нулей передаточной функции получила процедура редукции — понижение порядка модели объекта управления [15-17]. Понижение порядка модели объекта управления упрощает процесс разработки регулятора состояния. Однако при синтезе регуляторов состояния на основании редуцированной модели возникает необходимость проведения дополнительных исследований свойств

системы с регулятором пониженного порядка и полной моделью объекта с возможной корректировкой регулятора состояния.

Одним из возможных решений является конструктивная доработка объекта управления, например, посредством увеличения жесткости конструкции. В этом случае можно достичь увеличения расстояния между нулями и полюсами передаточной функции объекта управления. В работах [18-19] рассматриваются методы формирования желаемого спектра передаточных нулей объекта, которые также требуют конструктивной доработки объекта управления на этапе проектирования. Однако на практике такой подход не всегда осуществим.

Инвариантной характеристикой объекта управления по отношению к используемому базису в пространстве состояний является полнота или противоположная к ней вырожденность модели объекта управления [10-11, 20]. В работе [20] исследуется влияние расстояния между полюсами передаточной функции на вырождение модели объекта, однако в этих работах также не рассматривается возможное наличие нулей передаточной функции.

В [10] вводится понятие матрицы вырожденности объекта управления:

$$P_{oc} = P_o P_c, \quad (1)$$

где P_o — матрица наблюдаемости объекта, а P_c — матрица управляемости.

Матрица вырожденности имеет вид ганкелевой матрицы [21-23] и описывает связь между пространствами входных и выходных сигналов объекта управления и инвариантна к выбору базиса пространства состояний объекта управления [10]. В работах [21-22] ганкелева матрица системы используется для идентификации необходимой размерности модели объекта управления, а также для его редукции. Однако не рассматривается ее связь со структурой модели, в частности с наличием нулей.

Настоящая работа посвящена исследованию влияния нулей передаточной функции объекта на свойства регулятора состояния. Устанавливается взаимосвязь определителя матрицы вырожденности и коэффициентов регулятора состояния. Доказывается зависимость определителя матрицы вырожденности от взаимного расположения нулей и полюсов модели объекта. Предлагается способ структурного преобразования (декомпозиции) объекта управления при проектировании регуляторов состояния для объектов с нулями передаточной функции.

Настоящая работа является продолжением исследования проблем управления объектами с нулями передаточной функции, представленного в [10].

2. Связь матрицы вырожденности и коэффициентов регулятора состояния. Рассмотрим математическую модель линейного стационарного объекта с одномерным входом и одномерным выходом (SISO):

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}u, \\ y = \mathbf{C}\mathbf{x}. \end{cases} \quad (2)$$

Необходимо спроектировать регулятор состояния, обеспечивающий определенные динамические свойства системе управления объектом (2). При решении поставленной задачи используем принцип разделения процедур расчета модального управления и оценивания координат вектора состояния объекта (2).

Синтез модального регулятора удобнее всего осуществлять в том случае, когда модель объекта управления представлена в канонической управляемой форме [2, 10]:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_c = \mathbf{A}_c\mathbf{x}_c + \mathbf{B}_c u, \\ y = \mathbf{C}_c\mathbf{x}_c. \end{cases} \quad (3)$$

Передаточная функция объекта (2) является дробно-рациональной функцией комплексной переменной:

$$W(s) = \mathbf{C}(s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{B} = \frac{y(s)}{u(s)} = \frac{b_{n-1}s^{n-1} + \dots + b_1s + b_0}{s^n + a_{n-1}s^{n-1} + \dots + a_1s + a_0}. \quad (4)$$

Матрицы, характеризующие модель объекта управления в канонической управляемой форме (3) в соответствии с видом передаточной функции (4) выражаются следующим образом:

$$\mathbf{A}_c = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ -a_0 & -a_1 & -a_2 & \dots & -a_{n-1} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_c = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C}_c = \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ \vdots \\ b_1 \\ b_{n-1} \end{bmatrix}^T. \quad (5)$$

Представление модели объекта в каноническом управляемом базисе обеспечивает существование алгоритма управления, обеспечивающего любое заданное расположение корней характеристического уравнения замкнутой системы [7, 10]. Закон управления для объекта (2) можно записать следующим образом:

$$u = -\mathbf{K}_c\mathbf{x}_c. \quad (6)$$

Коэффициенты матрицы \mathbf{K}_c в каноническом управляемом базисе вычисляется следующим образом:

$$\mathbf{K}_c = \mathbf{a}_{cg} - \mathbf{a}_c, \quad (7)$$

где \mathbf{a}_{cg} — матрица-строка коэффициентов желаемого характеристического полинома замкнутой системы, а \mathbf{a}_c — матрица-строка коэффициентов характеристического уравнения матрицы \mathbf{A}_c .

Векторы состояния моделей (2) и (3) связаны следующим соотношением через матрицу преобразования базисов:

$$\mathbf{x}_c = \mathbf{M}_c \mathbf{x}, \quad (8)$$

при этом:

$$\mathbf{A}_c = \mathbf{M}_c \mathbf{A} \mathbf{M}_c^{-1}, \mathbf{B}_c = \mathbf{M}_c \mathbf{B}, \mathbf{C}_c = \mathbf{C} \mathbf{M}_c^{-1}. \quad (9)$$

Выразим матрицу преобразования базисов \mathbf{M}_c через матрицы управляемости объекта в разных базисах. Матрица управляемости в базисе (2) имеет следующий вид:

$$\mathbf{P}_c = \begin{bmatrix} \mathbf{B} & \mathbf{A}\mathbf{B} & \dots & \mathbf{A}^{n-1}\mathbf{B} \end{bmatrix}.$$

Матрица управляемости в базисе (3) имеет следующий вид:

$$\tilde{\mathbf{P}}_c = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_c & \mathbf{A}_c \mathbf{B}_c & \dots & \mathbf{A}_c^{n-1} \mathbf{B}_c \end{bmatrix}.$$

На основании (9) получаем следующее соотношение:

$$\tilde{\mathbf{P}}_c = \mathbf{M}_c \mathbf{P}_c.$$

Матрицы управляемости известны в обоих базисах, поэтому матрица преобразования базиса к каноническому управляемому виду будет иметь следующий вид:

$$\mathbf{M}_c = \tilde{\mathbf{P}}_c \mathbf{P}_c^{-1}. \quad (10)$$

На основании соотношений (8) и (10) перепишем закон управления (6) в следующем виде:

$$u = -\mathbf{K}_c \tilde{\mathbf{P}}_c \mathbf{P}_c^{-1} \mathbf{x}. \quad (11)$$

В большинстве практических случаев часть координат вектора состояния \mathbf{x} объекта (2) не измеряется напрямую, в связи с чем, возникает необходимость проектирования наблюдающего устройства. Представление модели объекта в каноническом наблюдаемом базисе гарантированно обеспечивает существование алгоритма, осуществляющего оценку вектора состояния объекта. Руководствуясь принципом дуальности Калмана, выберем матрицы канонической наблюдаемой формы следующим образом:

$$\mathbf{A}_o = \mathbf{A}_c^T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & -a_0 \\ 1 & 0 & \dots & 0 & -a_1 \\ 0 & 1 & \dots & 0 & -a_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 1 & -a_{n-1} \end{bmatrix}, \mathbf{B}_o = \mathbf{C}_c^T, \mathbf{C}_o = \mathbf{B}_c^T. \quad (12)$$

Математическая модель наблюдателя полной размерности в каноническом наблюдаемом базисе записывается следующим образом:

$$\begin{cases} \dot{\tilde{\mathbf{x}}}_o = \mathbf{A}_o \tilde{\mathbf{x}}_o + \mathbf{B}_o u + \mathbf{L}_o (y - \mathbf{C}_o \tilde{\mathbf{x}}_o), \\ y = \mathbf{C}_o \tilde{\mathbf{x}}_o. \end{cases} \quad (13)$$

В соответствии со структурой матриц \mathbf{A}_o , \mathbf{C}_o матрица входа наблюдателя по ошибке имеет следующий вид:

$$\mathbf{L}_o = \mathbf{a}_{og}^T - \mathbf{a}_o^T,$$

где \mathbf{a}_{og}^T — матрица столбец коэффициентов желаемого характеристического полинома наблюдателя, \mathbf{a}_o^T — матрица столбец коэффициентов характеристического полинома матрицы \mathbf{A}_o .

Построим наблюдатель пониженной размерности (наблюдатель Льюенбергера) для модели объекта управления с матрицами (12).

В соответствии с видом матрицы \mathbf{C}_o представим вектор состояния объекта в каноническом наблюдаемом базисе в следующем виде:

$$\mathbf{x}_o = \begin{bmatrix} \mathbf{w} \\ y \end{bmatrix}.$$

где y — измеряемая выходная переменная, а \mathbf{w} — вектор не измеряемых переменных состояния. В связи с этим запишем модель объекта управления в каноническом наблюдаемом базисе в следующем виде:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{w}} = \mathbf{A}_{11}\mathbf{w} + \mathbf{A}_{12}y + \mathbf{B}_1u; \\ \dot{y} = \mathbf{A}_{21}\mathbf{w} + \mathbf{A}_{22}y + \mathbf{B}_2u, \end{cases} \quad (14)$$

где матрицы объекта имеют следующий вид:

$$\mathbf{A}_{11} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A}_{12} = \begin{bmatrix} -a_0 \\ -a_1 \\ \dots \\ -a_{n-2} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A}_{21} = \begin{bmatrix} 0 \\ \dots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}^T,$$

$$\mathbf{A}_{22} = -a_{n-1}, \quad \mathbf{B}_1 = \begin{bmatrix} b_0 \\ \dots \\ b_{n-3} \\ b_{n-2} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_2 = b_{n-1}.$$

Вектор не измеряемых состояний \mathbf{w} входит в оба уравнения модели (14), что препятствует непосредственной оценке этого вектора. Введем в рассмотрение новый вектор \mathbf{v} согласно следующему соотношению:

$$\mathbf{w} = \mathbf{v} + \mathbf{L}y, \quad (15)$$

где $\mathbf{L} = [l_0 \ \dots \ l_{n-3} \ l_{n-2}]^T$ неизвестная матрица столбец, имеющая $n-1$ строку. Воспользовавшись выражением (15) из двух уравнений (14) получим дифференциальное уравнение относительно не измеряемого вектора \mathbf{v} в следующем виде:

$$\dot{\mathbf{v}} = (\mathbf{A}_{11} - \mathbf{L}\mathbf{A}_{21})\mathbf{v} + (\mathbf{A}_{11}\mathbf{L} + \mathbf{A}_{12} - \mathbf{L}\mathbf{A}_{21}\mathbf{L} - \mathbf{L}\mathbf{A}_{22})y + (\mathbf{B}_1 - \mathbf{L}\mathbf{B}_2)u. \quad (16)$$

Определим оценку $\tilde{\mathbf{v}}$ по значениям y и u согласно выражению:

$$\dot{\tilde{\mathbf{v}}} = (\mathbf{A}_{11} - \mathbf{L}\mathbf{A}_{21})\tilde{\mathbf{v}} + (\mathbf{A}_{11}\mathbf{L} + \mathbf{A}_{12} - \mathbf{L}\mathbf{A}_{21}\mathbf{L} - \mathbf{L}\mathbf{A}_{22})y + (\mathbf{B}_1 - \mathbf{L}\mathbf{B}_2)u. \quad (17)$$

Выполнив вычитание выражения (17) из выражения (16), получим дифференциальное уравнение ошибки оценивания:

$$\dot{\mathbf{v}} - \dot{\tilde{\mathbf{v}}} = (\mathbf{A}_{11} - \mathbf{L}\mathbf{A}_{21})(\mathbf{v} - \tilde{\mathbf{v}}).$$

Отсюда следует, что оценка $\tilde{\mathbf{v}}$ стремится к не измеряемому вектору \mathbf{v} в том случае, когда матрица $(\mathbf{A}_{11} - \mathbf{L}\mathbf{A}_{21})$ Гурвицева. Структура указанной матрицы, определяющей динамические свойства наблюдателя в соответствии с выражением (14) имеет следующий вид:

$$(\mathbf{A}_{11} - \mathbf{L}\mathbf{A}_{21}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & -l_0 \\ 1 & 0 & \dots & 0 & -l_1 \\ 0 & 1 & \dots & 0 & -l_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 1 & -l_{n-2} \end{bmatrix},$$

то есть является матрицей, сопровождающей следующий полином:

$$D_o = s^{n-1} + l_{n-2}s^{n-1} + \dots + l_1s + l_0.$$

Выбрав динамические свойства наблюдателя, окончательно определим алгоритм оценивания (17). Оценка вектора $\tilde{\mathbf{x}}_o$ с использованием выхода наблюдателя (17) пониженной размерности будет иметь следующий вид:

$$\tilde{\mathbf{x}}_o = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{w}} \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{v}} + \mathbf{L}y \\ y \end{bmatrix}.$$

Таким образом, независимо от типа наблюдателя — полной или пониженной размерности, может быть получена оценка вектора состояния объекта в каноническом наблюдаемом базисе.

Векторы состояния моделей (2) и (12) связаны следующим соотношением:

$$\mathbf{x}_o = \mathbf{M}_o \mathbf{x}, \quad (18)$$

при этом:

$$\mathbf{A}_o = \mathbf{M}_o \mathbf{A} \mathbf{M}_o^{-1}, \quad \mathbf{B}_o = \mathbf{M}_o \mathbf{B}, \quad \mathbf{C}_o = \mathbf{C} \mathbf{M}_o^{-1}. \quad (19)$$

Выразим матрицу преобразования базисов \mathbf{M}_o через матрицы наблюдаемости объекта в разных базисах. Матрица наблюдаемости в базисе (2) имеет следующий вид:

$$\mathbf{P}_o = \begin{bmatrix} \mathbf{C}^T & (\mathbf{C}\mathbf{A})^T & (\mathbf{C}\mathbf{A}^2)^T & \dots & (\mathbf{C}\mathbf{A}^{n-1})^T \end{bmatrix}^T.$$

Матрица наблюдаемости в базисе (12) имеет следующий вид:

$$\tilde{\mathbf{P}}_0 = \left[\mathbf{C}_0^T \quad (\mathbf{C}_0 \mathbf{A}_0)^T \quad (\mathbf{C}_0 \mathbf{A}_0^2)^T \quad \dots \quad (\mathbf{C}_0 \mathbf{A}_0^{n-1})^T \right]^T.$$

На основании соотношений (19) имеем:

$$\tilde{\mathbf{P}}_0 = \mathbf{P}_0 \mathbf{M}_0^{-1}.$$

Матрицы наблюдаемости известны в обоих базисах, поэтому матрица преобразования базиса к каноническому наблюдаемому виду определяется следующим выражением:

$$\mathbf{M}_0 = \tilde{\mathbf{P}}_0^{-1} \mathbf{P}_0. \quad (20)$$

Для реализации закона управления (11) используется вектор состояния наблюдателя $\tilde{\mathbf{x}}_0 = \mathbf{M}_0 \mathbf{x}$ полной или пониженной размерности, откуда находим $\mathbf{x} = \mathbf{M}_0^{-1} \tilde{\mathbf{x}}_0$. Подставив это значение в выражение (11), получим следующее соотношение для закона управления:

$$u = -\mathbf{K}_c \tilde{\mathbf{P}}_c \mathbf{P}_c^{-1} \mathbf{M}_0^{-1} \tilde{\mathbf{x}}_0.$$

В соответствии с выражением (20) последнее выражение преобразуется к следующему виду:

$$u = -\mathbf{K}_c \tilde{\mathbf{P}}_c \mathbf{P}_c^{-1} \mathbf{P}_0^{-1} \tilde{\mathbf{P}}_0 \tilde{\mathbf{x}}_0 \Rightarrow u = -\mathbf{K}_c \tilde{\mathbf{P}}_c (\mathbf{P}_0 \mathbf{P}_c)^{-1} \tilde{\mathbf{P}}_0 \tilde{\mathbf{x}}_0.$$

С учетом выражения для матрицы вырожденности (1), последнее выражение перепишем в следующем виде:

$$u = -\mathbf{K}_c \tilde{\mathbf{P}}_c (\mathbf{P}_{0c})^{-1} \tilde{\mathbf{P}}_0 \tilde{\mathbf{x}}_0. \quad (21)$$

Согласно выражению (21) при расчете матрицы обратных связей регулятора состояний с наблюдателем требуется обращение матрицы вырожденности \mathbf{P}_{0c} . При стремлении определителя этой матрицы к нулю модули коэффициентов усиления матрицы обратной связи стремятся к бесконечности.

Характеристикой двух полиномов связывающей расстояния между их корнями (для передаточной функции — между нулями и полюсами) является результат полиномов. Результат полиномов передаточной функции равен произведению всех расстояний между ее нулями и полюсами. Докажем равенство определителя матрицы вырожденности и результата полиномов.

3. Связь определителя матрицы вырожденности и результата полиномов передаточной функции. Рассмотрим математическую модель линейного стационарного объекта управления, записанную в форме «вход-выход» с передаточной функцией вида (4) и в форме «вход-состояние-выход» в каноническом управляемом базисе (3).

Матрица вырожденности объекта управления \mathbf{P}_{oc} имеет вид ганкелевой матрицы. Рассчитаем коэффициенты матрицы вырожденности с учетом коэффициентов матриц (5) объекта (3):

$$\mathbf{P}_{oc} = \mathbf{P}_o \mathbf{P}_c = \begin{bmatrix} d_0 & d_1 & d_2 & \dots & d_{n-1} \\ d_1 & d_2 & d_3 & \dots & d_n \\ d_2 & d_3 & d_4 & \dots & d_{n+1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{n-1} & d_n & d_{n+1} & \dots & d_{2n-2} \end{bmatrix}, \quad (22)$$

$$d_0 = CB = b_1,$$

$$d_1 = CAB = b_2 - b_1 a_1 = b_2 - d_0 a_1,$$

$$d_2 = CA^2 B = b_3 - b_1 a_2 - (b_2 - b_1 a_1) a_1 = b_3 - d_0 a_2 - d_1 a_1, \quad (23)$$

...

$$d_{n-1} = CA^{n-1} B = b_n - d_0 a_{n-1} - d_1 a_{n-2} - \dots - d_{n-2} a_1,$$

$$d_{n+k} = CA^{n+k} B = -d_k a_{n-1} - d_{k+1} a_{n-2} - \dots - d_{k+n-1} a_1, k = 0, 1, \dots, n-2.$$

Результат многочленов составляющих передаточную функцию (4) может быть получен несколькими методами: Сильвестра, Кронекера, Безу [23]. Для доказательства равенства определителя матрицы \mathbf{P}_{oc} результату полиномов передаточной функции (4) рассмотрим метод Сильвестра и метод Кронекера.

Определим результат полиномов $u(s)$ и $y(s)$ по методу Сильвестра.

Составим матрицу из коэффициентов полиномов:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 1 & a_1 & a_2 & \dots & \dots & a_n & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & a_1 & \dots & \dots & a_{n-1} & a_n & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & & \ddots & & & & & & \ddots & \\ 0 & 0 & \dots & 1 & \dots & \dots & & & a_{n-1} & a_n \\ 0 & 0 & \dots & \dots & b_1 & b_2 & \dots & \dots & b_{n-1} & b_n \\ 0 & 0 & \dots & b_1 & b_2 & \dots & & \dots & b_n & 0 \\ \vdots & & \ddots & \dots & & & & & & \vdots \\ 0 & b_1 & \dots & \dots & b_n & 0 & \dots & \dots & & 0 \\ b_1 & \dots & \dots & b_n & 0 & \dots & & & & 0 \end{bmatrix}. \quad (24)$$

Количество строк, составленных из коэффициентов полинома $u(s)$, равняется $n-1$, количество строк, составленных из коэффициентов полинома $y(s)$, равняется n , размерность матрицы \mathbf{M} — $(2n-1) \times (2n-1)$.

Результат в форме Сильвестра выражается следующим образом [23]:

$$R(u, y) = (-1)^{n(n-1)/2} \det \mathbf{M}. \quad (25)$$

Обозначим нулевой субрезультант полиномов следующим образом:

$$R^{(0)}(u, y) = \det \mathbf{M}. \quad (26)$$

Нулевой субрезультант равен результату полиномов с точностью до знака.

Определим результат полиномов $u(s)$ и $y(s)$ по методу Кронекера.

Метод Кронекера является терминальным методом вычисления результата и позволяет, используя разреженность матрицы \mathbf{M} , уменьшить размерность матрицы необходимой для вычисления результата до размерности полинома $u(s)$: $n \times n$ [23].

Выполним формальное разложение полиномов передаточной функции (4) в ряд Лорана по отрицательным степеням s :

$$\frac{y(s)}{u(s)} = \frac{c_0}{s} + \frac{c_1}{s^2} + \dots + \frac{c_j}{s^{j+1}}.$$

Умножим обе части полученного выражения на полином $u(s)$, затем приравниваем коэффициенты при одинаковых степенях s в ле-

вой и правой частях получившегося равенства. Формулы, выражающие коэффициенты c_j через коэффициенты полиномов следующие:

$$\begin{aligned}
 c_0 &= b_1, \\
 c_1 &= b_2 - c_0 a_1, \\
 c_2 &= b_3 - c_0 a_2 - c_1 a_1, \\
 &\dots \\
 c_{n-1} &= b_n - c_0 a_{n-1} - c_1 a_{n-2} - \dots - c_{n-2} a_1, \\
 c_{n+k} &= -c_k a_{n-1} - c_{k+1} a_{n-2} - \dots - c_{k+n-1} a_1, k = 0, 1, \dots, n-2.
 \end{aligned} \tag{27}$$

Вычислив величины, $c_0, c_1, \dots, c_{2n-2}$ составим из них ганкелеву матрицу:

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_0 & c_1 & c_2 & \dots & c_{n-1} \\ c_1 & c_2 & c_3 & \dots & c_n \\ c_2 & c_3 & c_4 & \dots & c_{n+1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ c_{n-1} & c_n & c_{n+1} & \dots & c_{2n-2} \end{bmatrix}. \tag{28}$$

Обозначим C_1, \dots, C_n ее главные миноры.

Имеет место формула (Кронекер) [22]:

$$R^{(k)} = a_0^{n+m-2k} C_{n-k}. \tag{29}$$

Формула (29) связывает субрезультанты полиномов с главными минорами матрицы (28).

Для нулевого субрезультанта полиномов передаточной функции (4) выражение (29) можно переписать следующим образом:

$$R^{(0)}(u, y) = \det \mathbf{C}. \tag{30}$$

Из выражения (30) следует, что определитель ганкелевой матрицы (28), с учетом выражений (25) и (26), с точностью до знака равняется результату полиномов. В то же время ганкелева матрица (28), с учетом соотношений (23) и (27), идентична матрице вырожденности объекта (22). Таким образом, определитель матрицы вырожденности равен результату полиномов передаточной функции с точностью до знака. Приведем доказательство для утверждения (30).

Рассмотрим произведение двух матриц размерностью $(2n-1) \times (2n-1)$ каждая:

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & \dots & & 0 \\ 0 & 1 & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \vdots & 0 & \ddots & & & & \\ \vdots & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & \\ & \vdots & 0 & c_0 & \dots & c_{n-1} & \\ & 0 & \ddots & c_1 & \dots & c_n & \\ 0 & c_0 & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \\ 0 & c_0 & c_1 & \dots & c_n & \dots & c_{2n-1} \\ c_0 & c_1 & c_2 & \dots & c_{n-1} & \dots & c_{2n-2} \end{bmatrix} \cdot$$

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} 1 & a_1 & a_2 & \dots & a_n & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & a_1 & \ddots & \vdots & \ddots & & \vdots \\ \vdots & 0 & 1 & \ddots & & & & \\ \vdots & \vdots & 0 & \ddots & & & \ddots & \vdots \\ & \vdots & \ddots & 1 & a_1 & \dots & a_{n-1} & a_n \\ & & & & \ddots & \ddots & a_{n-2} & a_{n-1} \\ & & & & & & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \ddots & \vdots & 1 & a_1 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot$$

Матрица \mathbf{Z} составлена из элементов матрицы \mathbf{C} , матрица \mathbf{X} является верхнетреугольной матрицей, составленной из коэффициентов полинома $u(s)$.

Определим определитель произведения матриц \mathbf{Z} и \mathbf{X} , как произведение определителей:

$$\det(\mathbf{Z} \times \mathbf{X}) = (\det \mathbf{Z}) \cdot (\det \mathbf{X}) = (\det \mathbf{C}) \cdot 1^{2n-1} = \det \mathbf{C}. \quad (31)$$

С другой стороны, выполнив умножение матриц \mathbf{Z} и \mathbf{X} , с учетом соотношений (27), получим матрицу \mathbf{M} (24), использованную в методе Сильвестра, тогда с учетом (26):

$$\det(\mathbf{Z} \times \mathbf{X}) = \det \mathbf{M} = R^{(0)}(u, y). \quad (32)$$

Сопоставляя выражения (31) и (32), получаем соотношение (30).

Аналогичная схема доказательства может быть использована для утверждения (29), для всех субрезультантов полиномов.

Таким образом, чем ближе расположен ноль передаточной функции (4) к какому-либо полюсу, тем меньше определитель матрицы вырожденности и тем больше увеличиваются модули коэффициентов регулятора. Соответственно, наличие нулей близких к полюсам передаточной функции напрямую влияет на величину коэффициентов регулятора, попытка коррекции таких полюсов приводит к повышению параметрической чувствительности объекта управления.

Рассмотрим возможность декомпозиции модели объекта управления для синтеза регулятора состояния при наличии нулей передаточной функции.

4. Декомпозиция объекта управления. Рассмотрим передаточную функцию (4) объекта управления, учитывая, что результат полиномов числителя и знаменателя совпадает с определителем матрицы вырожденности. Рассмотрим наиболее часто встречающийся на практике случай, когда передаточная функция не имеет кратных полюсов. При этом условии дробно-рациональная передаточная функция может быть представлена суммой элементарных дробей:

$$W(s) = \frac{r_1}{s - \alpha_1} + \frac{r_2}{s - \alpha_2} + \dots + \frac{r_n}{s - \alpha_n}, \quad (33)$$

где α_i — полюса передаточной функции (4), в том числе комплексно сопряжённые. Из (33) следует, что числители элементарных дробей могут быть вычислены следующим образом:

$$r_i = \lim_{s \rightarrow \alpha_i} (s - \alpha_i) W(s). \quad (34)$$

Число r_i , вычисляемое согласно (34), называется вычетом функции $W(s)$ в полюсе α_i . Выполнив вычисления согласно (34), получим:

$$r_i = \frac{b_{n-1} \prod_{j=1}^{n-1} (\alpha_i - \beta_j)}{\prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n-1} (\alpha_i - \alpha_j)},$$

где α_i — полюса передаточной функции $W(s)$, а β_j — нули передаточной функции.

Модуль числителя вычета в полюсе α_i пропорционален произведению расстояний этого полюса от всех нулей передаточной функции, а модуль знаменателя равен произведению расстояний этого полюса от остальных полюсов передаточной функции. Если полюс совпадает с каким-нибудь нулем передаточной функции, то соответствующий вычет равен нулю. Соответственно, чем ближе данный полюс к какому-либо нулю передаточной функции, тем меньше модуль соответствующего вычета. В структурной схеме сумме передаточных функций соответствует параллельное соединение соответствующих структурных элементов. По этой причине вычет в конкретном полюсе есть коэффициент передачи соответствующей ветви структурной схемы. Чем меньше модуль соответствующего вычета, тем меньше вклад соответствующей ветви структурной схемы в перенос энергии с входа объекта на его выход, в то время как попытки изменить данный полюс с использованием регуляторов состояния приводят к появлению чрезмерных по модулю коэффициентов регулятора.

Представим структурную схему объекта (2) с передаточной функцией (4) в виде, показанном на рисунке 1.

В такой интерпретации структурный элемент с передаточной функцией $\Delta(s)$ можно рассматривать как мультипликативную неопределенность для объекта с передаточной функцией $W_o(s)$.

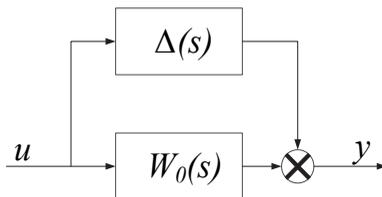


Рис. 1. Декомпозированная структурная схема объекта управления

Обозначим m_Δ сумму модулей вычетов в тех полюсах, которые относятся к передаточной функции $\Delta(s)$, а $m_\Sigma = \sum_{i=1}^n |r_i|$ — сумму модулей всех вычетов ряда (33). Построение $\Delta(s)$ следует осуществлять таким образом, чтобы выполнялось следующее условие:

$$\frac{m_{\Delta}}{m_{\Sigma}} \leq \delta,$$

где число δ характеризует часть потока энергии от входа к выходу, которая оказывает малое влияние на общее поведение объекта при подаче управляющего воздействия. Это число подлежит выбору, исходя из условий функционирования объекта и требований к проектируемой системе управления.

Представление объекта управления в виде, приведенном на рисунке 1, характерно в теории робастного управления. Использование теории робастного управления для проектирования систем управления, в том числе на базе пакета программ MATLAB, рассмотрены в работах [5-6, 24-25]. Следует отметить, что необходимо более детальное исследование возможностей синтеза регуляторов по предложенной схеме представления объекта управления, в том числе с использованием теории робастного управления.

5. Пример. Рассмотрим линейный объект управления с передаточной функцией:

$$W(s) = \frac{s + c}{(s + a)(s + b)}. \quad (35)$$

Вычеты в полюсах объекта (35):

$$r_a = \frac{c - a}{b - a}, r_b = \frac{c - b}{a - b}.$$

Представим объекта управления в трех канонических формах: диагональной, управляемой и наблюдаемой, и составим матрицы управляемости и наблюдаемости для каждой формы представления объекта.

Каноническая диагональная форма:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -a & 0 \\ 0 & -b \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} r_a \\ r_b \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C} = [1 \quad 1],$$

$$\mathbf{P}_c = \begin{bmatrix} \frac{a-c}{a-b} & \frac{a \cdot (c-a)}{a-b} \\ \frac{c-b}{a-b} & \frac{b \cdot (b-c)}{a-b} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{P}_o = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -a & -b \end{bmatrix}.$$

Каноническая управляемая форма:

$$\mathbf{A}_c = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -a \cdot b & -(a+b) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_c = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C}_c = [c \quad 1],$$

$$\mathbf{P}_{c1} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & -a-b \end{bmatrix}, \quad \mathbf{P}_{o1} = \begin{bmatrix} c & 1 \\ -a \cdot b & c-b-a \end{bmatrix}.$$

Каноническая наблюдаемая форма:

$$\mathbf{A}_o = \begin{bmatrix} 0 & -a \cdot b \\ 1 & -(a+b) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_o = \begin{bmatrix} c \\ 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C}_o = [0 \quad 1]$$

$$\mathbf{P}_{c2} = \begin{bmatrix} c & -a \cdot b \\ 1 & c-b-a \end{bmatrix}, \quad \mathbf{P}_{o2} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & -a-b \end{bmatrix}.$$

Составим матрицу вырожденности объекта управления, рассчитаем ее определитель, а также результат полиномов передаточной функции:

$$\mathbf{P}_{oc} = \begin{bmatrix} 1 & -(a+b-c) \\ -(a+b-c) & a^2 + a \cdot b - c \cdot a + b^2 - c \cdot b \end{bmatrix},$$

$$\det(\mathbf{P}_{oc}) = (c-b)(a-c), \quad \text{res}(W(s)) = (b-c)(a-c).$$

Несложно убедиться, что матрица вырожденности объекта одинакова во всех рассмотренных базисах. Также, очевидно, что определитель матрицы вырожденности и результат полиномов совпадают с точностью до знака.

Пусть желаемый полином передаточной функции замкнутой системы будет иметь следующий вид:

$$D_g = s^2 + a_1 s + a_2.$$

Предположим, что для объекта спроектирован наблюдатель полной размерности, восстанавливающий переменные состояния объекта.

Коэффициенты регулятора по состояниям наблюдателя рассчитываются в соответствие с (7) и (21):

$$K_U(1) = \frac{a_1 \cdot c + a \cdot b - a \cdot c - b \cdot c - a_2}{(c-b) \cdot (a-c)};$$

$$K_U(2) = \frac{-a_1 \cdot a \cdot c + a_1 \cdot a \cdot b + a_2 \cdot c - a_1 \cdot b \cdot c - a \cdot b^2 - a^2 \cdot b + a^2 \cdot c + b^2 \cdot c + a \cdot b \cdot c}{(c-b) \cdot (a-c)}$$

Из приведенных соотношений следует, что значения коэффициентов регулятора обратно пропорциональны определителю матрицы вырожденности объекта.

Проведем численное моделирование системы с использованием следующих параметров: $a=25$, $b=15$, $a_1=100$, $a_2=2400$, $c=10 \dots 30$.

На рисунке 2 приведена зависимость модуля определителя матрицы вырожденности объекта в зависимости от расположения нуля объекта. На рисунке 3 приведена зависимость модулей коэффициентов передачи по состояниям наблюдателя в зависимости от расположения нуля объекта.

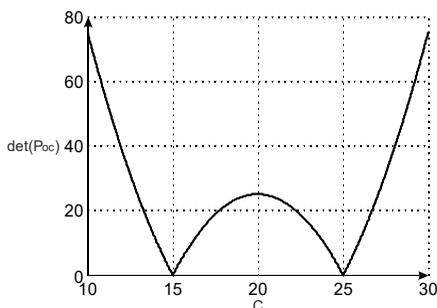


Рис. 2. Модуль определителя матрицы вырожденности

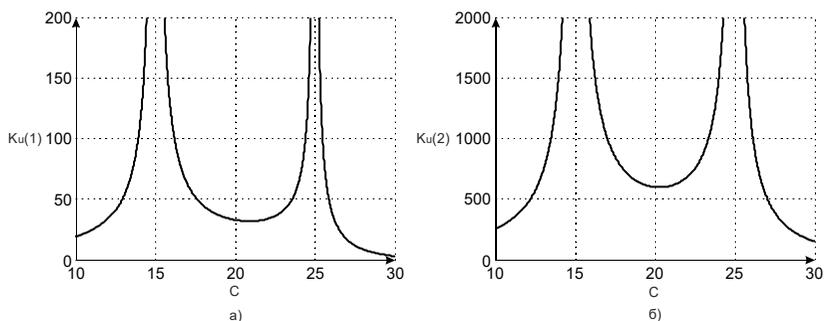


Рис. 3. Модули коэффициентов регулятора: а) - $K_U(1)$; б) - $K_U(2)$

Представленные зависимости наглядно демонстрируют обратную зависимость коэффициентов регулятора от значения определителя матрицы вырожденности.

На рисунке 4 представлены значения модулей вычетов передаточной функции в зависимости от расположения нуля объекта.

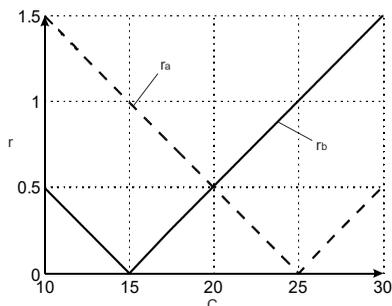


Рис. 4. Вычеты передаточной функции объекта управления

Очевидно, что при приближении нуля к полюсу, значение вычета по этому полюсу уменьшается, то есть уменьшается количество энергии, передаваемое на выход системы по подпространству, соответствующему этому полюсу.

6. Заключение. В результате проведенного исследования было установлено, что нули передаточной функции могут существенно влиять на свойства регуляторов состояния. Коэффициенты регулятора обратно пропорциональны определителю матрицы вырожденности объекта управления. Определитель матрицы вырожденности объекта управления равен произведению расстояний между всеми полюсами и всеми нулями объекта управления — результату полиномов передаточной функции. Соответственно, попытка коррекции полюса, близко расположенного к какому-либо нулю передаточной функции объекта, влечет за собой чрезмерный рост абсолютных значений коэффициентов регулятора. С другой стороны, подобный полюс слабо влияет на связь между пространствами входных и выходных сигналов объекта. В связи с этим полюса, находящиеся вблизи нулей, разумно выделять в виде передаточной функции мультипликативной неопределенности в составе объединенного объекта управления. Выделение подобных полюсов целесообразно осуществлять путем сравнения модулей вычетов передаточной функции во всех полюсах.

Литература

1. Андриевский Б.Р., Фрадков А.Л. Избранные главы теории автоматического управления с примерами на языке MATLAB // СПб: Наука. 2000. 475 с.
2. Singh K.V., Ouyang H. Pole assignment using state feedback with time delay in friction-induced vibration problems // Acta Mechanica. 2013. vol. 224. no. 3. pp. 645–656.

3. *Chu E.K.* Optimization and pole assignment in control system design // International Journal of Applied Mathematics and Computer Science. 2001. vol. 11. no. 5. pp. 1035–1053.
4. *Abdullin A.A., Drozdov V.N., Plotitsyn A.A.* Modified Design Method of an Optimal Control System for Precision Motor Drive // WSEAS Transactions on Systems and Control. 2014. vol. 9. no. 1. pp. 652–657.
5. *Gazdos, F., Marholt, J.* Optimization of closed-loop poles for robust constrained control // Proceedings of the 2015 20th International Conference on Process Control (PC 2015). 2015. pp. 158–163.
6. *Nurges. U.* Robust pole assignment via reflection coefficients of polynomials // Automatica (Journal of IFAC). 2006. vol. 42. no. 7. pp. 1223–1230.
7. *Балонин Н.А.* Новый курс теории управления движением // СПб.: Изд-во С.-Петербург. ун-та. 2000. 160 с.
8. *Ефимов С.В., Гайворонский С.А., Замятин С.В., Суходоев М.С.* Определение желаемой области расположения доминирующих полюсов замкнутой системы с учетом её нулей // Известия Томского политехнического университета. 2008. Т. 312. № 5. С.57–61.
9. *Anisimov A.A., Kotov D.G., Tararykin S.V., Tyutikov V.V.* Analysis of Parametric Sensitivity and Structural Optimization of Modal Control Systems with State Controllers // Journal of Computer and System Sciences International. 2011. vol. 50. no. 5. pp. 698–719.
10. *Дроздов В.Н., Абдуллин А.А.* Проблемы управления объектами с нулями передаточной функции. // Труды СПИИРАН. 2016. № 1(44). С. 114–132.
11. *Ушаков А.В., Бирюков Д., Дударенко Н.А.* Контроль вырождения динамических объектов и систем: граничный подход // Известия ВУЗов. Приборостроение. 2013. Т. 56. № 4. С. 34–37.
12. *Воронин А.В.* Квалиметрия достижимости и возмущаемости линейных динамических систем // Известия Томского политехнического университета. 2013. Т. 323. № 5. С. 74–78.
13. *Чуканов С.Н.* Количественная оценка управляемости и наблюдаемости сложных динамических сетей // Информатика и системы управления. 2015. №4(46). С. 58–66.
14. *Tararykin, S.V., Anisimov, A.A.* Synthesis of robust control systems with state observers for electromechanical objects based on gramian method // Proceedings of the 9th International Conference on Power Drives Systems (ICPDS 2016). 2016. pp. 1–5.
15. *Rergis C.M., Messina A.R., Betancourt R.J.* Model-order reduction using truncated modal balanced realization // North American Power Symposium (NAPS 2015). 2015. pp. 1–6.
16. *Apolonskii V.V., Tararykin S.V.* Methods for the Synthesis of Reduced State Controllers of Linear Dynamic Systems // Journal of Computer and Systems Sciences International. 2014. vol. 53. no. 6. pp. 799–807.
17. *Романова И.К.* Современные методы редукции нелинейных систем и их применение для формирования моделей движущихся объектов // Вестник МГТУ им. Н.Э.Баумана. Серия «Машиностроение». Спец.выпуск «Специальная робототехника и мехатроника». 2012. С. 122–133.
18. *Kouvaritakis B, MacFarlane A.G.J.* Geometric approach to analysis and synthesis of system zeros. Part 1. Square systems // International Journal of Control. 1976. vol. 23. no. 2. pp. 149–166.
19. *Asanov A.Z., Dem'yanov D.N.* Assigning the set of zeros in control systems with parallel compensation // Journal of Computer and Systems Sciences International. 2013. vol. 52. no. 5. pp. 726–736.
20. *Ушаков А.В., Дударенко Н.А.* Структура собственных векторов матриц состояния многоканальных систем как вырождающий фактор // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2012. Т.12. №5(81). С. 52–57.

21. *Fazel M., Pong T.K., Sun D., Tseng P.* Hankel matrix rank minimization with applications to system identification and realization // *SIAM Journal on Matrix Analysis and Applications*. 2013. vol. 34. no. 3. pp. 946–977.
22. *Alavian A., Rotkowitz M.C.* On a hankel-based measure of decentralized controllability and observability // *IFAC-PapersOnLine*. 2015. vol. 28. no. 22. pp 227–232.
23. *Калинина Е.А., Умешев А.Ю.* Теория исключения: Учеб. Пособие // СПб.: Изд-во НИИ химии СПбГУ. 2002. 72 с.
24. Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления: учебник / Под ред. Н.Д. Егупова // М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2001. 744 с.
25. *Dlapa M.* Parametric uncertainties and time delay robust control design toolbox // *IFAC-PapersOnLine*. 2015. vol. 28. no. 14. pp. 296–301.

Абдуллин Артур Александрович — к-т техн. наук, доцент кафедры электротехники и прецизионных электромеханических систем, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики» (Университет ИТМО). Область научных интересов: системы управления объектами с упругими связями, структурная и параметрическая идентификация. Число научных публикаций — 12. artur.abdullin@gmail.com; Кронверкский проспект, 49, Санкт-Петербург, 197101; п.т.: +79062763010.

Дроздов Валентин Нилович — д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры электротехники и прецизионных электромеханических систем, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики» (Университет ИТМО). Область научных интересов: цифровое управление техническими системами, влияние нулей на регулятор, управление промышленным электроприводом, дискретные системы управления техническими объектами, проблемы управляемости и наблюдаемости. Число научных публикаций — 199. drozdovuprint@rambler.ru; Кронверкский проспект, 49, Санкт-Петербург, 197101; п.т.: +7(921)653-55-84.

Маматов Александр Геннадьевич — аспирант кафедры электротехники и прецизионных электромеханических систем, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики» (Университет ИТМО), инженер кафедры электротехники и прецизионных электромеханических систем, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики» (Университет ИТМО). Область научных интересов: системы управления объектами с упругими связями, проблемы управляемости и наблюдаемости, оптимальное управление техническими объектами.. Число научных публикаций — 4. amamatov@corp.ifmo.ru; Кронверкский проспект, 49, Санкт-Петербург, 197101; п.т.: +79516692517.

Поддержка исследований. Работа выполнена при государственной финансовой поддержке ведущих университетов Российской Федерации (субсидия 074-U01).

A.A. ABDULLIN, V.N. DROZDOV, A.G. MAMATOV
**INFLUENCE OF TRANSFER FUNCTION ZEROS ON
 CONTROLLER PARAMETERS**

DrozdoV V.N., Abdullin A.A., Mamatov A.G. Influence of Transfer Function Zeros on Controller Parameters.

Abstract. The paper is devoted to the influence of transfer function zeros on state feedback controller parameters. Nowadays, during the modal control system design process, the most attention is paid to the analysis of transfer function poles. If transfer function zeros are located closely to the poles, the control object tends to singularity, when the influence of the input control signals to the output signals becomes weaker. This fact leads to the designing of state-space controllers with extremely high values of control coefficients. Available methods for selecting the desired poles of closed loop systems are represented by the following variants: quantitative evaluation of the controllability and observability of object models and object model reduction. These methods have some disadvantages: dependence on the state-space representation of the control object model, ignoring some parts and characteristics of the control object model. In this paper, to analyze the state feedback controller parameters the invariant of the state-space representation characteristic is used – catalecticant (Hankel) matrix. As a result, it was found that control coefficients of the state feedback controller are inversely proportional to the determinant of the catalecticant matrix of the control object, and the determinant of the catalecticant matrix is equal to the resultant of transfer function polynomials. A method of converting the block diagram of the control object model using the residues of the transfer function was suggested. As a result of the conversion, poles, which cause high values of control coefficients, are isolated as a multiplicative uncertainty in the object model structure. The robust control theory can be used for control system designing with such organization of the control object.

Keywords: zeros of transfer function, modal control, state feedback controller, Hankel matrix, resultant of polynomials, residue, multiplicative uncertainty.

Abdullin Artur Aleksandrovich — Ph.D., associate professor of electrical engineering and precision electromechanical systems department, ITMO University (Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics). Research interests: control systems of technical objects with elastic coupling, structural and parametric identification. The number of publications — 12. artur.abdullin@gmail.com; 49, Kronverksky Pr., St. Petersburg, 197101, Russia; office phone: +79062763010.

DrozdoV Valentin Nilovich — Ph.D., Dr. Sci., professor, professor of electrical engineering and precision electromechanical systems department, ITMO University (Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics). Research interests: discrete control systems of technical objects, controllability and observability problems, discrete control systems of technical objects, controllability and observability problems. The number of publications — 199. drozdovuprint@rambler.ru; 49, Kronverksky Pr., St. Petersburg, 197101, Russia; office phone: +7(921)653-55-84.

Mamatov Aleksandr Gennad'yevich — Ph.D. student of electrical engineering and precision electromechanical systems department, ITMO University (Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics), engineer of electrical engineering and precision electromechanical systems department, ITMO University (Saint Peters-

burg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics). Research interests: control systems of technical objects with elastic coupling, controllability and observability problems. The number of publications — 4. amamatov@corp.ifmo.ru; 49, Kronverksky Pr., St. Petersburg, 197101, Russia; office phone: +79516692517.

Acknowledgements. This research is supported by Government of Russian Federation (Grant 074-U01).

References

1. Andrievskij B.R., Fradkov A.L. *Izbrannye glavy teorii avtomaticheskogo upravlenija s primerami na jazyke MATLAB* [Selected chapters of control theory with examples in MATLAB]. Saint-Petersburg: Nauka. 2000. 475 p. (In Russ.).
2. Singh K.V., Ouyang H. Pole assignment using state feedback with time delay in friction-induced vibration problems. *Acta Mechanica*. 2013. vol. 224. no. 3. pp. 645–656.
3. Chu E.K. Optimization and pole assignment in control system design. *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*. 2001. vol. 11. no. 5. pp. 1035–1053.
4. Abdullin A.A., Drozdov V.N., Plotitsyn A.A. Modified Design Method of an Optimal Control System for Precision Motor Drive. *WSEAS Transactions on Systems and Control*. 2014. vol. 9. no. 1. pp. 652–657.
5. Gazdos, F., Marholt, J. Optimization of closed-loop poles for robust constrained control. Proceedings of the 2015 20th International Conference on Process Control (PC 2015). 2015. pp 158–163.
6. Nurges. U. Robust pole assignment via reflection coefficients of polynomials. *Automatica (Journal of IFAC)*. 2006. vol. 42. no. 7. pp. 1223–1230.
7. Balonin N.A. *Novyj kurs teorii upravlenija dvizheniem* [New course on the theory of motion control]. Saint-Petersburg: Izd-vo S.-Peterb. un-ta. 2000. 160 p. (In Russ.).
8. Efimov S.V., Gayvoronskiy S.A., Zamyatin S.V., Suhodoev M.S. [Determination of the desirable arrangement area of dominating poles of the closed system in view of its zeroes]. *Izvestija Tomskogo politehnicheskogo universiteta – Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*. 2008. vol. 312. no. 5. pp. 57–61. (In Russ.).
9. Anisimov A.A., Kotov D.G., Tararykin S.V., Tyutikov V.V. Analysis of Parametric Sensitivity and Structural Optimization of Modal Control Systems with State Controllers. *Journal of Computer and System Sciences International*. 2011. vol. 50. no. 5. pp. 698–719.
10. Drozdov V.N., Abdullin A.A. [Control problems of objects with zeros of the transfer function]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*. 2016. vol. 1(44). pp. 114–132. (In Russ.).
11. Ushakov A.V., Birjukov D., Dudarenko N.A. [Control over dynamic objects and systems degeneration: gramian approach]. *Izvestija VUZov. Priborostroenie – Journal of Instrument Engineering*. 2013. vol. 56. no. 4. pp. 34–37. (In Russ.).
12. Voronin A.V. [Qualimetry of accessibility and disturbance of linear dynamic systems]. *Izvestija Tomskogo politehnicheskogo universiteta – Proceedings of the Tomsk Polytechnic University*. 2013. vol. 323. no. 5. pp. 74–78. (In Russ.).
13. Chukanov S.N. [Quantitative evaluation of controllability and observability of complicated dynamic networks]. *Informatika i sistemy upravlenija – Information and Control Systems*. 2015. vol. 4(46). pp. 58–66. (In Russ.).
14. Tararykin, S.V., Anisimov, A.A. Synthesis of robust control systems with state observers for electromechanical objects based on gramian method. Proceedings of the 9th International Conference on Power Drives Systems (ICPDS 2016). 2016. pp. 1–5.

15. Rergis C.M., Messina A.R., Betancourt R.J. Model-order reduction using truncated modal balanced realization. North American Power Symposium (NAPS 2015). 2015. pp. 1–6.
16. Apolonskii V.V. and Tararykin S.V. Methods for the Synthesis of Reduced State Controllers of Linear Dynamic Systems. *Journal of Computer and Systems Sciences International*. 2014. vol. 53. no. 6. pp. 799–807.
17. Romanova I.K. [Modern methods of non-linear systems order reduction and their applications for forming models of moving objects]. *Vestnik MGTU im. N.Je. Baumana. Serija «Mashinostroenie. 2012. Spec.vypusk «Special'naja robototekhnika i mehatronika» – Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series «Mechanical Engineering» Special Issue «Special Robotics and Mechatronics»*. 2012. pp. 122–133. (In Russ.).
18. Kouvaritakis B, MacFarlane A.G.J. Geometric approach to analysis and synthesis of system zeros. Part 1. Square systems. *International Journal of Control*. 1976. vol. 23. no. 2. pp. 149–166.
19. Asanov A.Z., Dem'yanov D.N. Assigning the set of zeros in control systems with parallel compensation. *Journal of Computer and Systems Sciences International*. 2013. vol. 52. no. 5. pp. 726–736.
20. Ushakov A.V., Dudarenko N.A. [Eigenvectors structure of state matrices of multi-channel systems as a degenerate factor]. *Nauchno-tehnicheskij vestnik informacionnyh tehnologij, mehaniki i optiki – Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 2012. vol. 12. no. 5(81). pp. 52–57.
21. Fazel M., Pong T.K., Sun D., Tseng P. Hankel matrix rank minimization with applications to system identification and realization. *SIAM Journal on Matrix Analysis and Applications*. 2013. vol. 34. no. 3. pp. 946–977.
22. Alavian A., Rotkowitz M.C. On a hankel-based measure of decentralized controllability and observability. *IFAC-PapersOnLine*. 2015. vol. 28. no. 22. pp 227–232.
23. Kalinina E.A., Uteshev A.Ju. *Teorija isključenja: Ucheb. posobie* [Elimination theory: tutorial]. Saint-Petersburg: Izd-vo NII himii SPbGU. 2002. 72 p. (In Russ.).
24. *Metody robustnogo, nejro-nechetkogo i adaptivnogo upravlenija: Uchebnik. Pod red. N.D. Egupova* [Methods of robust, neuro-fuzzy and adaptive control: textbook. Edited by Egupov N.D.]. Moscow: Izd-vo MGTU im. N.Je. Baumana. 2001. 744 p. (In Russ.).
25. Dlapa M. Parametric uncertainties and time delay robust control design toolbox. *IFAC-PapersOnLine*. 2015. vol. 28. no. 14. pp 296–301.

В.Ю. ОСИПОВ, В.И. ВОРОБЬЁВ, Д.К. ЛЕВОНЕВСКИЙ
**ПРОБЛЕМЫ ЗАЩИТЫ ОТ ЛОЖНОЙ ИНФОРМАЦИИ В
КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЯХ**

Осипов В.Ю., Воробьёв В.И., Левоневский Д.К. Проблемы защиты от ложной информации в компьютерных сетях.

Аннотация. Анализируется текущее состояние в области защиты от ложной информации в компьютерных сетях и формулируются актуальные проблемы, связанные с этой защитой. Предлагается подход к оценке мероприятий защиты от такой информации на основе использования марковской модели дезинформирования. Раскрывается архитектура перспективной системы анализа информации в компьютерных сетях по требованиям достоверности. В рамках этой архитектуры рассматриваются усовершенствованные методы анализа достоверности текстов. Предлагается комплексный подход к использованию известных и предложенных методов для оперативного выявления ложной информации в компьютерных сетях. Кроме того, метод может применяться в области борьбы с киберпреступностью и терроризмом для поиска сетевых ресурсов и коммуникационных площадок, которые могут быть использованы для организации противоправной деятельности.

Ключевые слова: достоверность, ложная информация, анализ текста, классификация, онтология, информационная безопасность.

1. Введение. В последние годы в условиях различных конфликтов, конкурентной борьбы за новые технологии, рынки сбыта, энергетические, биологические и другие ресурсы резко возросла угроза намеренного распространения ложной информации (дезинформации) в Интернете. Известно, что посредством дезинформации можно ввести людей в заблуждение и навязать неадекватное общественное мнение. Также в некоторой мере возможно манипулирование сознанием и поведением как отдельных личностей, так и групп людей. Злоумышленники могут усиливать или ослаблять взгляды людей на различные события, жизненные ценности, выполняемые работы, на поведение в сложившихся ситуациях и т.п. То, что одним из каналов распространения ложной информации является Интернет, обусловлено особенностями информационной инфраструктуры, к которым относятся простота и дешевизна доступа, размытость государственных границ, широкие возможности манипулирования информацией и ее восприятием, высокий уровень анонимности доступа к сети.

В поисковых системах без труда можно найти многочисленные сайты с объективно ложной информацией. В большом количестве распространяются поддельные новости о якобы произошедших резонансных событиях (теракты, смерть известных людей, финансовые потрясения). Зачастую для привлечения внимания используются приемы, искажающие информацию о произошедших событиях.

Для защиты населения от ложной информации в Интернете необходимо наличие эффективной системы противодействия ей. В общем виде под такой системой понимается совокупность взаимосвязанных, организационных, технических, правовых и других мероприятий, обеспечивающих: своевременную профилактику, выявление, блокирование, удаление ложной информации в Интернете, устранение последствий, ответственность злоумышленников за противоправные действия. Для обеспечения функционирования такой системы требуется соответствующее научно-методическое обеспечение [1].

Проблема защиты от ложной информации существует с давних пор [2], но с появлением и активным развитием Интернета ситуация резко изменилась. Существенно возросли объемы распространяемой информации и возможности по ее использованию в целях ввести в заблуждение людей. Как показывают международные события последних лет, через Интернет осуществимы широкомасштабные информационные воздействия на людей с различными террористическими, политическими, религиозными, экономическими и другими целями. При этом усложнились задачи по оперативному обнаружению, распознаванию информационных воздействий, выявлению источников их порождения и прогнозированию таких угроз. Традиционные методы защиты в этих условиях недостаточно эффективны [3]. Они предусматривают активное участие человека в анализе информации на предмет ее деструктивности и опасности для пользователей Интернета. Это требует существенных затрат людских и материальных ресурсов. В последние годы стали появляться методы и средства, позволяющие автоматизировать этот процесс [4], что значительно повышает его оперативность и снижает трудоемкость [5]. Для некоторых аспектов информационной безопасности решения уже есть. Можно привести в качестве примера известный модуль Avast Online Security [6], работающий с веб-сайтами. В основу работы этого модуля положены методы рейтинговых оценок. Модуль использует базу данных веб-репутации, которая обновляется с учетом информации, поступающей от пользователей. Такой модуль дает возможность пользователю оценивать веб-ресурсы и предоставляет ему информацию об их рейтинге, а также о том, вовлечен ли веб-ресурс в схемы фишинга, мошенничества, содержит ли он вредоносное программное обеспечение. Этот модуль собирает данные о вредоносных страницах и страницах с плохой репутацией и предупреждает пользователя при попытке перехода на такой сайт, блокирует навязчивые всплывающие окна и защищает от отслеживания деятельности пользователя в сети. В целом модуль Avast Online Security позволяет оце-

нивать страницы с точки зрения наличия вредоносного программного обеспечения и мошеннической активности, но не учитывает их достоверность. Для этого в настоящее время применяются различные модели и методы:

- анализа текстов (морфологический, синтаксический и семантический анализ [7], тематическое моделирование [8], оценка достоверности [9], анализ культурологических канонов сетевых сообществ [10]);

- анализа изображений и видео (генерация словесных описаний [11], определение элементарных ситуаций и действий [12], прогнозирования ситуаций [13]);

- анализа звуковых потоков (определение эмоций в речи [14, 15], распознавание истинности речи [16]).

Для обнаружения дезинформирующих ДВ в Интернет прорабатывают применение различных алгоритмов машинного обучения, а для прогнозирования таких воздействий используют методы регрессионного анализа и другие [27].

Однако эти известные методы не в полной мере учитывают всю специфику процессов выявления и защиты от ложной информации в компьютерных сетях и обладают невысоким уровнем их автоматизации. Во многом не совершенны методы выявления смыслового содержания в информационном воздействии (в виде деструктивной графической, текстовой, числовой, музыкальной и комбинированной информации) и соотнесения его с возможными угрозами для населения. Это существенно затрудняет автоматическую проверку информации по требованиям достоверности.

Требуется разработка новых моделей и методов, позволяющих своевременно выявлять и прогнозировать угрозы от дезинформирующих ДВ, обосновывать целесообразные мероприятия по их блокировке и устранению последствий.

2. Модель процесса дезинформации. В интересах решения поставленной задачи рассмотрим обобщенную модель процесса дезинформации пользователей Интернета с учетом мероприятий противодействия. Структуру такого процесса можно представить в виде рисунка 1.

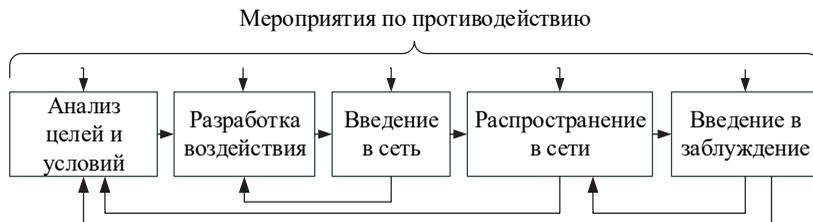


Рис. 1. Обобщенная структура процесса дезинформирования

Процесс начинается с анализа злоумышленником целей дезинформации, объектов воздействия и условий реализации. На основе этого анализа злоумышленником осуществляется разработка дезинформирующего деструктивного воздействия (ДВ). При разработке ДВ злоумышленники стремятся сформировать их так, чтобы они были подобны истинным сигналам по опознавательным статическим и динамическими характеристиками. При этом основной объем таких воздействий по содержанию согласуют с реальными фактами. Ложная информация в таких воздействиях может занимать незначительную, но емкую по содержанию часть. При формировании ДВ принимают во внимание априорную вероятность появления на объектах воздействия истинных сигналов с аналогичными опознавательными параметрами, как у ложных сигналов. После разработки ДВ злоумышленникам требуется получить доступ к интересующим ресурсам Интернета. ДВ могут массированно выставляться на сайтах Интернета или рассылаться по конкретным почтовым адресам. В ряде случаев в ДВ могут быть предусмотрены механизмы саморазмножения в сети. При воздействии ДВ на объекты возможны различные негативные эффекты с далеко идущими последствиями. Цель процесса — порождение следствий, устраивающих заказчика: получение коммерческой выгоды, создание паники в массах или, напротив, ее недопущение, создание «образа врага» или скрывание важных событий за второстепенными фактами.

Для защиты от ДВ проводятся различные мероприятия по противодействию. Они могут быть направлены на снижение предпосылок для разработки ДВ злоумышленниками. Также возможны противодействия попыткам непосредственной разработки ДВ. Для недопущения внесения на значимые сайты Интернета ложной информации и распространения (размножения) ДВ могут предусматриваться свои мероприятия защиты. В интересах снижения рисков от влияния ДВ возможно своевременное выявление, блокирование и удаление таких воздействий.

В интересах прогнозирования угрожающих событий рассмотренному процессу дезинформирования можно поставить в соответствие граф возможных состояний. Опираясь на центральную предельную теорему теории вероятностей для потоков событий, этот процесс можно описать с применением математического аппарата марковских процессов. Влияние мероприятий защиты можно учесть через изменение параметров переходов анализируемых процессов из одного состояния в другое. Используя такую модель, эффективность мероприятий защиты пользователей Интернет от дезинформации можно оценивать по приращениям вероятностей и времени перехода процесса в интересующие состояния за счет проводимых мероприятий противодействия.

Так, в соответствии с рисунком 1 процесс дезинформирования формализуется в виде графа состояний марковского процесса (рисунок 2).

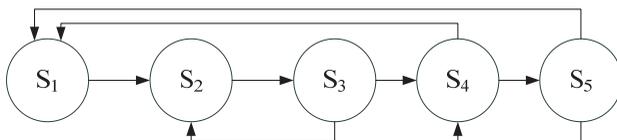


Рис. 2. Граф состояний марковского процесса дезинформирования пользователей Интернета

В качестве состояний на рисунке 2 приводятся: S_1 — анализ злоумышленником целей дезинформирования и условий их реализации, S_2 — разработка ДВ, S_3 — введение ДВ в сеть, S_4 — распространение ДВ в сети, S_5 — введение пользователей сети в заблуждение. Дугам графа ставятся в соответствие значения интенсивностей переходов процесса из одного состояния в другое, которые зависят от реализации мероприятий защиты.

Этому графу соответствует система из пяти дифференциальных уравнений:

$$\frac{dP_1(t)}{dt} = \lambda_{41}P_4(t) + \lambda_{51}P_5(t) - \lambda_{12}P_1(t)$$

.....

$$\frac{dP_5(t)}{dt} = \lambda_{45}P_4(t) - (\lambda_{51} + \lambda_{54})P_5(t)$$

В этой системе $P_1(t), \dots, P_5(t)$ — вероятности нахождения процесса в состояниях 1, ..., 5 на момент времени t ; $\lambda_{12}, \dots, \lambda_{54}$ — интенсивности переходов процесса из одного состояния в другое. Если эти интенсивности, начальное и интересующее состояния определены, то такая система дифференциальных уравнений легко разрешается известными методами с применением, например пакета прикладных программ MatLab. Умея распознавать выделенные состояния и зная $\lambda_{12}, \dots, \lambda_{54}$, можно прогнозировать наступление угрожающих событий. Основные сложности при использовании таких моделей состоят в определении интенсивностей переходов процесса из одних состояний в другие и в распознавании текущих состояний. Для их определения необходимы реальные наблюдения событий. Такие модели, наряду с методами регрессионного анализа могут успешно применяться при планировании и обосновании мероприятий противодействия дезинформирующим ДВ.

В интересах такого противодействия могут создаваться специальные центры. Например, создание центра информационного анализа и противодействия, в обязанности которого входит выявление дезинформации с использованием информационно-коммуникационных технологий, предусмотрено биллем Н.Р.5181 Конгресса США. Технические меры противодействия заключаются в анализе публикуемой информации и выявлении ее источника, что в дальнейшем может стать основанием для применения юридических мер (расследование, удаление информации, привлечение к ответственности). К техническим мерам относятся действия по обзору сети, извлечению образцов информации из веб-страниц, вычислению характеристик этих образцов информации, классификации образцов, нейтрализации воздействия (блокирование, удаление).

3. Метод выявления ложной информации в компьютерных сетях. В основе предлагаемого метода лежит идея использования нового распределенного программного приложения. Архитектура этого приложения представлена на рисунке 3. Она разделяется на 3 уровня.

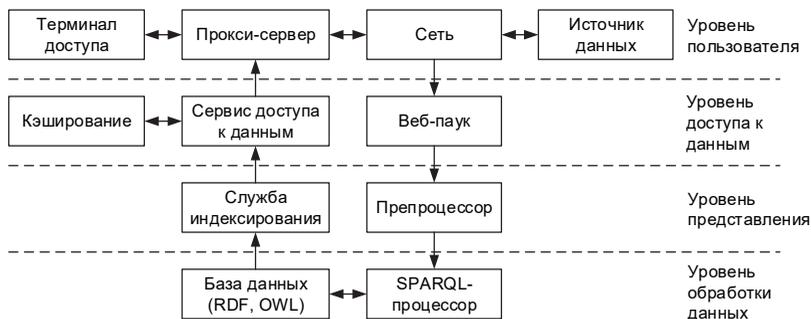


Рис. 3. Схема функционирования приложения

Согласно этой идее на уровне пользователя происходит коммуникация между клиентом (терминалом доступа) и сетевыми ресурсами. Единственным компонентом приложения на этом уровне является прокси-сервер, который выполняет мониторинг трафика (например, HTTP-запросов и ответов), получает сведения о запрашиваемых ресурсах и в зависимости от настроек предоставляет пользователю характеристики этих ресурсов или блокирует их при выявлении нежелательной информации.

На уровне доступа к данным выполняется получение и обработка сведений о сетевых ресурсах. К этому уровню относятся:

- служба поиска — веб-паук, выполняющий обход веб-ресурсов в сети, поиск и загрузку данных из этих ресурсов;

- сервис доступа к данным, который предоставляет прокси-серверу сведения о характеристиках веб-ресурсов;
- сервис кэширования, который хранит часто используемые запросы и ускоряет выдачу результата.

На уровне представления реализуются механизмы поиска ресурсов и информации о них в хранилище данных. К этому уровню относятся:

- сервис индексирования, предназначенный для поиска сведений об образце информации в хранилище данных (например, по хэшу);
- препроцессор, предназначенный для извлечения образцов информации (текста, изображений, аудио, видео) из контейнеров (веб-страниц, документов Word и т.п.), а также извлечение текста и образов из мультимедийных объектов.

На уровне обработки данных выполняется анализ и сопоставление свойств информационных объектов и сохранение информации о них в хранилище данных.

В соответствии с предлагаемым методом выявления ложной информации предусматривается представление и обработка данных на предмет их достоверности. Более детально, согласно ему осуществляется выделение образцов информации из контейнеров (веб-страница, документ), оценка свойств этих образцов и их классификация на основе полученных оценок.

Алгоритм, реализующий этот метод, состоит из ряда шагов:

Шаг 1. Получение контейнера с информацией путем обхода заданного сегмента сети веб-пауком.

Шаг 2. Выделение образцов (объектов) информации из контейнера (текст, изображение, видео, звук) методом парсинга HTML-тегов и подгрузки ссылочных данных.

Шаг 3. Создание для каждого образца информационного объекта вида <ID, информация, метаданные> и сохранение его в базе данных. К метаданным относятся сведения об источнике информации, времени доступа и публикации, ключевые слова.

Шаг 4. Определение и оценка достоверности характеристик (таблица 1) информационного объекта на основе информации, метаданных и связей с другими информационными объектами.

Шаг 5. Определение и оценка достоверности свойств информационного объекта.

Шаг 6. Расчет интегрального показателя достоверности информационного объекта.

В результате мы имеем дело с многоуровневой системой показателей и правил их оценки, позволяющих перейти от оценки достоверности характеристик информационного объекта, вычисляемых непосред-

ственно, к достоверности существенных свойств объекта как носителя информации, а от них — к достоверности информационного объекта в целом. Схему оценки достоверности информационных объектов можно представить в виде рисунка 4, где вершинами обозначены реализуемые функции, а дугам ставятся в соответствие весовые коэффициенты.

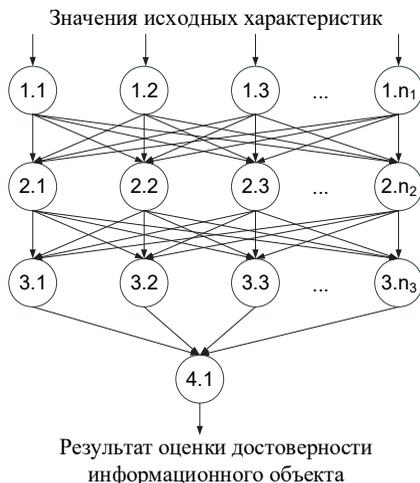


Рис. 4. Схема оценки достоверности информационных объектов

В некотором смысле такую схему оценки можно трактовать как классификатор информационных объектов по уровням достоверности. Поясним такой подход.

Каждому информационному объекту можно поставить в соответствие многоуровневую систему его характеристик (свойств). Отнесение таких объектов к ложной информации в общем случае предусматривает анализ его характеристик на различных уровнях иерархии с учетом их взаимосвязей. Для случаев, когда известна многомерная плотность $f(y_1, \dots, y_n)$ распределения характеристик y_1, \dots, y_n информационного объекта, вероятность P_{ou} отнесения его к достоверной информации можно рассчитать по формуле:

$$P_{ou} = P_a \int_{Y_1} \dots \int_{Y_n} f(y_1, \dots, y_n) dy_1 \dots dy_n,$$

где P_a — априорная вероятность наличия достоверной информации; Y_1, \dots, Y_n — области значений для истинных характеристик информационного объекта.

Если считать независимыми друг от друга характеристики y_1, \dots, y_n , то:

$$P_{ou} = P_a \int_{y_1} f_1(y_1) dy_1 \dots \int_{y_n} f_n(y_n) dy_n,$$

где $f_1(y_1), \dots, f_n(y_n)$ — одномерные плотности распределения характеристик y_1, \dots, y_n . Согласно этим выражениям информационный объект может быть отнесен к ложной информации при низкой априорной вероятности P_a или при низкой вероятности достоверности хотя бы одной из его характеристик.

На практике необходимо учитывать неравнозначность вклада каждой характеристики в P_{ou} . Для определения достоверности множества одноуровневых, но не равнозначных характеристик информационного объекта, отражающих некоторое его свойство, можно использовать выражение:

$$P_{ou}^* = \sum_{i \in \Omega} a_i P_{ou_i},$$

где P_{ou_i} — вероятность достоверности i -й характеристики объекта; — относительный вес этой характеристики, $P_{ou}^* \leq 1$.

С учетом этого интегральный показатель W оценки достоверности информационного объекта можно рассчитать по правилу: $W = W_{z_i}$ при $z = Z$ и $i = 1$:

$$W_{z_i} = \sum_{j=1}^{n_{z-1}} a_{z_{ij}} W_{z-1,j}; \quad i = \overline{1, n_z}; \quad z = \overline{1, Z},$$

где z — номер уровня обработки характеристик; Z — число уровней; n_z — число различных характеристик, влияющих на достоверность свойств информационного объекта, на $z + 1$ уровне; $a_{z_{ij}}$ — относительный вклад показателя $W_{z-1,i}$ в W_{z_j} . На уровне $z = 1$ в качестве показателей W_{z_i} могут выступать вероятности достоверности исходных характеристик информационного объекта.

Физический смысл такого интегрального показателя — взвешенная сумма частных нормированных показателей.

Базовые исходные характеристики информационных объектов сведены в таблицу 1.

Таблица 1. Набор характеристик образца данных

<i>Характеристика</i>	<i>Значения</i>
<i>Метаданные</i>	
Адрес источника	URL
Уровень домена	Целое, больше 1
Протокол доступа	Незащищенный Защищенный без валидного сертификата Защищенный с валидным сертификатом Защищенный с расширенной валидацией
Дата публикации	Дата
Объем	Целое (байты)
Рейтинг	Вещественное, -1...1
<i>Связи</i>	
Количество совпадений	Целое, 0...∞
в т.ч. с более ранней датой публикации	Целое, 0...∞
в т.ч. с более поздней датой публикации	Целое, 0...∞
Лучшая степень совпадения	Целое, 0...∞
в т.ч. с более ранней датой публикации	Целое, 0...∞
в т.ч. с более поздней датой публикации	Целое, 0...∞
Моменты распределения степени совпадения	Вещественный вектор
Количество гиперссылок на объект	Целое, 0...∞
Моменты распределения интегрального показателя и рейтинга ресурсов, ссылающихся на объект	Вещественный вектор
Моменты распределения интегрального показателя и рейтинга ресурсов, на которые объект ссылается	Вещественный вектор
<i>Содержимое</i>	
Стилистические маркеры	Вещественный вектор
Психолингвистические маркеры	Вещественный вектор
Лексические маркеры	Вещественный вектор
Семантические маркеры	Вещественный вектор
Степень соответствия:	
контента и заголовка	Вещественное, 0...1
контента и описания	Вещественное, 0...1
контента и ключевых слов	Вещественное, 0...1
Степень однородности	Вещественное, 0...1

К важным свойствам информационных объектов, прежде всего, следует отнести их структурные, частотные и содержательные особенности отдельных конструкций и объектов в целом.

Целью применения системы правил является классификация информационных объектов и выделение признаков, которые могут характеризовать эти объекты как ложные.

С использованием предложенного метода по значениям интегрального показателя можно относить анализируемые информационные объекты к различным уровням достоверности. Однако при этом необходимо знать области допустимых истинных значений оцениваемых характеристик и свойств информационных объектов.

Рассмотрим далее особенности анализа текстовых данных для определения свойств образцов информации в рамках предложенного метода.

4. Анализ текстовых данных. Ввиду постоянного увеличения количества текстовых документов в электронной форме необходимо наличие эффективных алгоритмов их классификации и анализа.

Рассмотрим n текстовых документов $D = \{D_1, D_2, \dots, D_n\}$. Пусть известно, что эти документы могут быть разделены на m тем $T = \{T_1, T_2, \dots, T_m\}$. Документы с индексами $I = \{I_1, I_2, \dots, I_m\}$, $I_j = \{I_{j1}, I_{j2}, \dots, I_{jk_j}\}$ принадлежат теме T_j .

Рассмотрим в качестве примера две темы: $T = \{T_1, T_2\}$, $I_1 = \{1, 2\}$, $I_2 = \{10, 11\}$.

В данном примере мы точно знаем, что документы с индексами 1 и 2 принадлежат первой теме, а документы с индексами 10 и 11 принадлежат второй теме. Здесь мы можем определить принадлежность любого документа к определенной теме, то есть считать, что документ D_i принадлежит T_1 или что он не принадлежит T_2 . Этот подход может быть расширен с использованием классов слов. Классы объединяют близкие по значению слова. Например, класс «дезинформация» состоит из слов «ложь», «миф», «слух» и так далее. Классы могут также состоять из других классов. Таким образом, класс «большая ложь» содержится в классе «ложь». Если мы знаем, что слово принадлежит классу «большая ложь», мы можем сказать, что оно принадлежит классу «дезинформация».

Естественным образом коллекция всех слов может быть разделена на такие классы, которые образуют древовидную структуру вида тип-подтип. На верхушке этой структуры расположен класс «что-то», который содержит все слова. Решение с использованием

классов отличается тем, что коллекция W определена другим образом. Коллекция W содержит классы слов, не сами слова. Следовательно, она будет меньше.

В [17] рассмотрены три алгоритма классификации текста. Первое решение (алгоритм) основано на использовании ключевых слов. Второе использует классы слов. Третье основано на использовании смешанного алгоритма. Ранее в СПИИРАН в работе [17] для сравнения двух документов была собрана коллекция текстовых документов, которая содержала около 1000 новостей из пяти тем. Размер этих документов был около 1 кб. Исследование проводилось для нескольких тем. Для получения результатов мы изменяли только коллекцию документов D и коллекцию индексов I . В итоге было извлечено более 150 результатов. В 75% случаев метод, основанный на использовании ключевых слов, был точнее. Опираясь на данные результаты предлагается построить систему поиска на основе статистического метода.

Различные подходы к этой проблеме заявлены рядом патентов [18-22]. Большинство заявленных проектов делают основной акцент на разработку глобальных опознавательных-преобразовательных фильтров, роль которых состоит в схеме кодирования — декодирования многообразия языка и создания надлингвистической базы индексов смысловой нагрузки. Очевидная проблема в подобных подходах, кроме громоздкой лингвистически-смысловой свертки, представляется в процессе декодирования. Можно несколько десятков слов свернуть в один смысловой индекс, но очень трудно дешифровать этот индекс адекватно запросу (эффект обратного перевода). Предлагаемая модель не требует серьезной смысловой интерпретации запроса (ключа), а опознает его по статистическим характеристикам структурных единиц текста. Наиболее близким аналогом из перечисленных работ является [18].

Идеологической основой рассматриваемой нами задачи является попытка преодоления противоречия между литературными (субъективными) законами языка при описании какого-либо предмета (процесса, явления) и формализованными (объективными) алгоритмами распознавания смысла как логического модуля, отображаемого в виде математического образа. Рассмотрим способ извлечения информационной структуры любой статьи, независимо от стиля ее написания. Фактически, информационная характеристика страницы Интернета состоит из четырех составляющих:

- заголовок страницы;
- перечень ключевых слов, составленный автором;
- краткое описание страницы;
- собственное содержание страницы.

Первые три элемента достаточно субъективны. Предлагаемый метод ориентирован на четвертый элемент. Он предусматривает сканирование текста и выделение собственного набора ключевых слов, объективно соответствующих содержанию. В этом случае машина обрабатывает любой безликий объект, ассоциируя его с его порядковым номером. Кроме того, он не требует искусственно заданной аналитической модели (функции распределения), ему безразлична профессиональная направленность информации, то есть не требуется специализированных библиотек, что очень важно в том случае, если содержание статьи находится на стыке различных областей знаний. Следовательно, такой способ идентификации абсолютно объективен, независим от рейтинга, позиции в каталоге и смысловой трактовки информационного модуля. Важна лишь тематическая насыщенность, обеспечивающая устойчивые статистические характеристики, что, кстати, исключит обращения к «мертвым ссылкам».

Конкретная цель данной задачи заключается в моделировании одной из составляющих частей робота-анализатора на основе статистического метода анализа и синтеза показателей при информационном дефиците с применением метода свертки показателей, разработанного в [23]. Суть метода заключается в формировании сводного статистического показателя объекта путем формирования вектора отдельных показателей, выбора синтезирующей функции и определения вектора весовых коэффициентов. В качестве исследуемого предмета мы принимаем текстовый модуль (статью) направленной тематики, например, нечисловой, неточной и неполной информации с целью получить систему статистических показателей.

За исходное предположение принимается тот факт, что заметная повторяемость определенной группы слов (с учетом семантического анализа) в тексте достаточно большого объема должна нести информацию о содержании статьи, что позволяет частоту повторяемости рассматривать как численную характеристику потенциально возможного ключевого слова. Иными словами, мы пытаемся создать числовой образ нечисловой информации, что позволит впоследствии ранжировать числовой ряд, полученный с использованием указанного метода.

Таким образом, считая любое слово как смысловую единицу объектом исследования на начальном этапе, а его повторяемость — численной характеристикой объекта, мы имеем входные данные для расчета статистических показателей составляющих элементов исследуемого текста, что при определенной обработке можно трактовать как математический отпечаток текстового файла.

Другой подход основан на семантической сети (Semantic Web), при котором компьютеры могут использовать обозначения с хорошо определенной и пригодной для машинной интерпретации семантикой, чтобы обмениваться знаниями. Знания, представленные на языках Се-

мантической сети, например на языке структурированного описания ресурсов (RDF), отличаются как от обычно неструктурированного произвольного текста, который можно обнаружить на большинстве Web-страниц, так и от высокоструктурированной информации в базах данных. С другой стороны в рамках одного документа, документы Семантической сети (Semantic Web Document, SWD) могут быть смешением конкретных фактов, определением классов и свойств, логических ограничений и метаданных.

Один из вариантов описания семантики — это построение математической модели языка [24, 25], в которой любое слово русского языка можно рассматривать как имя функции. При этом конкретное значение слово получит только после подстановки аргументов, а его смысл будет вычислен по мере выполнения функции. Предложение в данном случае — это законченная суперпозиция функций, а смысл предложения вычисляется при построении и выполнении этой суперпозиции. Такой подход к семантическому анализу позволяет в том числе построить онтологию, описывающие предложения. Кроме того, онтологии, как и тезаурус, можно использовать еще на этапе семантического анализа. В этом случае наиболее эффективно их совместное использование, где онтология описывает комплекс понятий и отношений предметной области, а тезаурус формирует подобную систему понятий и отношений в рамках лингвистических знаний по предметной области [25]. Описанные выше методики можно обозначить как семантический анализ неструктурированной информации, к которой на сегодняшний день можно отнести и множество документов на языке HTML. Эти исследования в основном делают попытку решения трудных для формализации задач.

Для онтологического моделирования можно использовать формальное представление онтологии в виде:

$$O = (E, D, R, P),$$

где E — множество сущностей; D — множество их определений; R — множество отношений; P — множество правил [26].

Процесс онтологического моделирования начинается с разделения понятий на две категории: классы (концепты) и их свойства (слоты). Классы разрабатываемой онтологии описывают понятия предметной области. Каждый из классов может иметь свой подкласс, который предоставляет более подробное описание, чем его надкласс. Задача слота — описать свойства класса и экземпляра. Свойства дают возможность делать выводы об общих свойствах классов. Свойство — это бинарное отношение. Различают два типа свойств:

1. свойства-значения — это отношения между представителями классов и типами данных;
2. свойства-объекты — это отношения между представителями двух классов.

Описание данных категорий строится на основе языков XML, RDF и OWL, дающие возможность создавать классы, свойства и отдельные экземпляры, то есть создать структуру онтологий. Приведем пример использования этих трех компонентов, определим класс сущностей «Слухи» и некоторые свойства «Слухи», такие как «Слухи-желания», «Слухи-пугала» и «Разобщающие агрессивные слухи».

Средствами синтаксиса RDF класс и его свойств будут описаны так:

```
<Class ID="hearing"/>
<Property ID="desire"/>
<Property ID="scare"/>
<Property ID="aggressive"/>
```

После выделения классов, можно перейти к описанию отдельных экземпляров. Пусть ложная информация в следующем: «Айболит, президент страны Лимпопо, угрожает России».

Лимпопо будет представляться следующим образом:

```
<Country ID="Россия">
<name>Айболит</name>
<Country>Лимпопо</Country>
<aggressive resource="Россия"/>
</Country>
```

Подобное описание можно обобщить и использовать как метаописание. OWL позволяет так же вводить ограничения на свойства, области распространения и отношения. Известны связанные между собой форматы, которые удовлетворяют описанной структуре семантических данных и предназначены для использования в Web (рисунок 5).

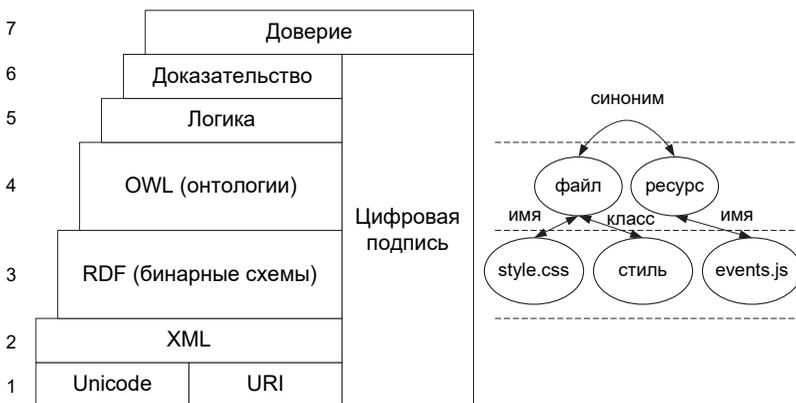


Рис. 5. Форматы семантических данных

На рисунке 5 изображена схема обработки данных, где данные описываются на языках RDF и OWL, поисковые запросы — на формальном языке запросов SPARQL, который наследует конструкции SQL — SELECT, FROM, WHERE, процедура поиска осуществляется при помощи процессора SPARQL. Таким образом, совокупность собранных вместе элементов позволяет искать информацию в предварительно подготовленных, формализованных на языках RDF и OWL семантических данных.

5. Заключение. Рассмотренные проблемы и методы защиты от ложной информации в компьютерных сетях уточняют взгляды на теорию и практику такой защиты. Противодействие процессу дезинформации можно свести к решению ряда частных задач. Для прогнозирования процессов дезинформации в компьютерных сетях и обескровления мероприятий противодействия предлагается использовать предложенную модель этого процесса. В интересах оперативного выявления такой информации разработан усовершенствованный метод ее анализа по требованиям достоверности. Оценку достоверности информации рекомендуется осуществлять по интегральному показателю — взвешенной сумме частных нормированных показателей достоверности ее свойств. Применение разработанного метода совместно с известными решениями позволяет сформировать комплексный подход, ориентированный на широкий круг возможных ситуаций, проявляющихся в компьютерных сетях. Предложенный метод применим при разработке приложений-ассистентов с более широкой функциональностью, позволяющей пользователю сети отфильтровать информацию, не отвечающую требованиям достоверности. Такой метод также может использоваться при борьбе с киберпреступностью и терроризмом для поиска сетевых ресурсов и коммуникационных площадок, которые могут быть использованы для организации противоправной деятельности.

Литература

1. *Осипов В.Ю., Юсупов Р.М.* Информационный вандализм, криминал и терроризм как современные угрозы обществу // Труды СПИИРАН. 2009. №8. С. 34–45.
2. *Осипов В.Ю., Ильин А.П., Фролов В.П., Кондратюк А.П.* Радиоэлектронная борьба. Теоретические основы // Петродворец: ВМИРЭ. 2006. 302 с.
3. *Алексеева И.Ю. и др.* Информационные вызовы национальной и международной безопасности // М.: ПИР-Центр. 2001. 328 с.
4. *Bartlett J., Reynolds L.* The State of the Art 2015: a literature review of social media intelligence capabilities for counter-terrorism // Demos. 2015. 98 p.
5. *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.
6. Avast Online Security browser extension: Overview. URL: www.avast.ru/faq.php?article=AVKB18 (дата обращения: 14.04.2017).

7. *Смирнов И.В., Шелманов А.О., Кузнецова Е.С., Храмоин И.В.* Семантико-синтаксический анализ естественных языков. Часть II. Метод семантико-синтаксического анализа текстов // Искусственный интеллект и принятие решений. 2014. № 1. С. 11–24.
8. *Karpovich S., Smirnov A., Teslya N., Grigorev A.* Topic Model Visualization With IPython // Proceedings of the 20th Conference of FRUCT association. 2017. pp. 131–137.
9. *Dong X.L. et al.* Knowledge-Base Trust: Estimating the Truthworthiness of Web Sources. URL: arxiv.org/pdf/1502.03519v1.pdf (дата обращения: 11.04.2017).
10. *Александров В.В., Зайцева А.А., Кулешов С.В.* Построение глоссариев культурологических канонов кибер-социальных групп в социальных сетях // Международный научный журнал «Инновационная наука». 2016. №12-2. С. 13–17.
11. *Karpathy A., Fei-Fei L.* Deep Visual-Semantic Alignments for Generating Image Descriptions // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition 2015 (CVPR 2015). 2015. pp. 3128–3137.
12. *Lillo I., Niebles J.C., Soto A.* Sparse composition of body poses and atomic actions for human activity recognition in RGB-D videos // Image and Vision Computing. 2017. vol. 59. pp. 63–75.
13. *Batchuluun G., Kim J.H., Hong H.G.* Fuzzy system based human behavior recognition by combining behavior prediction and recognition // Expert Systems with Applications. 2017. vol. 81. pp. 108–133.
14. *Yogesh C.K. et al.* Hybrid BBO_PSO and higher order spectral features for emotion and stress recognition from natural speech // Applied Soft Computing. 2017. vol. 56. pp. 217–232.
15. *Kaya H., Karpov A., Salah A.* Robust Acoustic Emotion Recognition based on Cascaded Normalization and Extreme Learning Machines // Proceedings of the 13th International Symposium on Neural Networks. 2016. LNCS 9719. pp. 115–123.
16. *Budkov V., Vatamaniuk I., Basov V., Volf D.* Investigation of Speech Signal Parameters Reflecting the Truth of Transmitted Information // Proceedings of the 18th International Conference on Speech and Computer (SPECOM 2016). 2016. LNAI 9811. pp. 419–426.
17. *Воробьев В.И и др.* Исследование и выбор криптографических стандартов на основе интеллектуального анализа документов // Труды СПИИРАН. 2016. №5(48). С. 69–87.
18. *Харламов А.А.* Способ формирования смыслового портрета текста и устройство для его осуществления // Патент РФ. № 2000127135. 2003.
19. *Poncet J. et al.* Access by content based computer system. US Patent no. WO 2001033419 A2. 2003.
20. *Sheth A., Avant D., Bertram C.* System and method for creating a semantic web and its applications in browsing, searching, profiling, personalization and advertising. US Patent. no. WO 2001069428 A1. 2001.
21. *Omoigui N.* System and method for knowledge retrieval, management, delivery and presentation. US Patent. no. 20100070448 A1. 2003.
22. *Gardner S.* Ontology-based information management system and method. US Patent. no. 7225183 B2. 2007.
23. *Хованов Н.В.* Оценка сложных объектов в условиях дефицита информации. К столетию метода сводных показателей А.Н. Крылова // Труды 8-й международной научной школы «Моделирование и анализ безопасности и риска в сложных системах». 2008. СПб.: ИПМАШ РАН. С. 18-28.
24. *Перминов С. В., Афанасьев С. В.* Семантический способ поиска информационных аномалий через Web // Труды СПИИРАН. 2006. №3. Т. 1. С. 279–287.
25. *Перминов С.В.* Система семантического поиска // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2008. №4. Т. 6. С. 45–50.

26. *Нариньяни А. С.* Кентавр по имени ТЕОН: Тезаурус + Онтология // Труды международного семинара Диалог'2001 по компьютерной лингвистике и ее приложениям. 2001. Т. 1. С. 184–188.
27. *Ferrara E. et al.* Predicting online extremism, content adopters, and interaction reciprocity // Proceedings of the 8th International Conference on Social Informatics. 2016. Part II. pp. 22–39.

Осипов Василий Юрьевич — д-р техн. наук, профессор, заведующий лабораторией информационно-вычислительных систем и технологий программирования, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН). Область научных интересов: интеллектуальные системы, моделирование, информационная безопасность. Число научных публикаций — 100. osipov_vasily@mail.ru; 14-я линия В.О., 39, Санкт-Петербург, 199178; р.т.: +7(812)328-08-87, Факс: +7(812)328-44-50.

Воробьев Владимир Иванович — д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории информационно-вычислительных систем и технологий программирования, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН). Область научных интересов: информационная безопасность, облачные и параллельные вычисления. Число научных публикаций — 110. vvi@iias.spb.su; 14-я линия В.О., 39, Санкт-Петербург, 199178; р.т.: +7(812)3284369, Факс: +7(812)3284450.

Левоневский Дмитрий Константинович — научный сотрудник лаборатории информационно-вычислительных систем и технологий программирования, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН). Область научных интересов: информационная безопасность, защита информации, компьютерные сети, моделирование компьютерных процессов, технологии программирования. Число научных публикаций — 20. dl@iias.spb.su; 14-я линия В.О., 39, Санкт-Петербург, 199178; р.т.: +7(812)328-43-69, Факс: +7(812)328-44-50.

Поддержка исследований. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №16-29-09482).

V.Yu. OSIPOV, V.I. VOROBIEV, D.K. LEVONEVSKIY
**PROBLEMS OF PROTECTION AGAINST FALSE INFORMATION
 IN COMPUTER NETWORKS**

Osipov V.Yu., Vorobiev V.I., Levonevskiy D.K. Problems of Protection against False Information in Computer Networks.

Abstract. This paper provides an analysis of the present state in the field of protection against false information in computer networks and formulates current problems related to this protection. An approach to assessing protection activities on the basis of the Markov chain of the disinformation process is proposed. The architecture of a future system of data analysis is described. It implies enhanced methods of text trustworthiness analysis. The proposed complex approach, based on the known and suggested methods, enables detecting false information in computer networks promptly. Furthermore, the proposed method can be used for countering terrorist activities and cybercrimes in order to search for network resources which may be involved in unlawful activities.

Keywords: trustworthiness, false information, text analysis, classification, ontology, information security.

Osipov Vasily Yurievich — Ph.D., Dr. Sci., professor, head of computing & information systems and programming technologies laboratory, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of Russian Academy of Sciences (SPIIRAS). Research interests: intelligent systems, modeling, information security. The number of publications — 100. osipov_vasily@mail.ru; 39, 14-th Line V.O., St. Petersburg, 199178, Russia; office phone: +7(812)328-08-87, Fax: +7(812)328-44-50.

Vorobiev Vladimir Ivanovich — Ph.D., Dr. Sci., professor, chief researcher of computing & information systems and programming technologies laboratory, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of Russian Academy of Sciences (SPIIRAS). Research interests: information security, distributed and cloud computations. The number of publications — 110. vvi@iias.spb.su; 39, 14-th Line V.O., St. Petersburg, 199178, Russia; office phone: +7(812)3284369, Fax: +7(812)3284450.

Levonevskiy Dmitriy Konstantinovich — researcher of computing & information systems and programming technologies laboratory, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of Russian Academy of Sciences (SPIIRAS). Research interests: information security, computer security, computer networks, modeling of information processes, programming technology. The number of publications — 20. dl@iias.spb.su; 39, 14-th Line V.O., St. Petersburg, 199178, Russia; office phone: +7(812)328-43-69, Fax: +7(812)328-44-50.

Acknowledgements. This research is supported by RFBR (grant 16-29-09482).

References

1. Osipov V.Yu., Yusupov R.M. *Informacionnyj vandalizm, kriminal i terrorizm kak sovremennye ugrozy obshhestvu* [Information vandalism, crime and terrorism as modern threats to the society]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*. 2009. vol. 8. pp. 34–45. (In Russ.).

2. Osipov V.Yu., Ilyin A.P., Frolov V.P., Kondratyuk A.P. *Radioelektronnaya borba. Teoreticheskiye osnovy* [Electronic warfare. Theoretical basis]. Petrodvorets: VMIRE. 2006. 302 p. (In Russ.).
3. Alekseeva I.Yu. et al. *Informatsionnye vyzovy natsionalnoy i mezhdunarodnoy bezopasnosti* [Information challenges against national and international security]. M.: PIR-Centr. 2001. 328 p. (In Russ.).
4. Bartlett J., Reynolds L. The State of the Art 2015: a literature review of social media intelligence capabilities for counter-terrorism. Demos. 2015. 98 p.
5. Kotenko I.V., Chechulin A.A., Komashinsky D.V. [Automated categorization of web-sites for inappropriate content blocking]. *Problemy informatsionnoy bezopasnosti. Kompyuternye sistemy – Information security problems. Computer systems*. 2015. vol. 2. pp. 69–79. (In Russ.).
6. Avast Online Security browser extension: Overview. Available at: <https://www.avast.ru/faq.php?article=AVKB18> (accessed: 14.04.2017).
7. Smirnov I.V., Shelmanov A.O., Kuznetsova E.S., Khramoin I.V. [Semantic-syntactic analysis of natural languages. Part II. Method for semantic-syntactic analysis of texts]. *Iskusstvennyy intellekt i primyatie resheniy – Artificial intelligence and decision making*. 2014. vol. 1. pp. 11–24. (In Russ.).
8. Karpovich S., Smirnov A., Teslya N., Grigorev A. Topic Model Visualization With IPython. Proceedings of the 20th Conference of FRUCT association. 2017. pp. 131–137.
9. Dong X.L. et al. Knowledge-Base Trust: Estimating the Truthworthiness of Web Sources. Available at: arxiv.org/pdf/1502.03519v1.pdf (accessed: 11.04.2017).
10. Alexandrov V.V., Zaytseva A.A., Kuleshov S.V. [Building glossaries of culturological canons of cyber-social groups in social networks]. *Mezhdunarodny nauchnyy zhurnal “Innovatsionnaya nauka” – International scientific journal “Innovative science”*. 2016. vol. 12-2. pp. 13–17. (In Russ.).
11. Karpathy A., Fei-Fei L. Deep Visual-Semantic Alignments for Generating Image Descriptions. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition 2015 (CVPR 2015). 2015. pp. 3128–3137.
12. Lillo I., Nibbles J.C., Soto A. Sparse composition of body poses and atomic actions for human activity recognition in RGB-D videos. *Image and Vision Computing*. 2017. vol. 59. pp. 63–75.
13. Batchuluun G., Kim J.H., Hong H.G. Fuzzy system based human behavior recognition by combining behavior prediction and recognition. *Expert Systems with Applications*. 2017. vol. 81. pp. 108–133.
14. Yogesh C.K. et al. Hybrid BBO_PSO and higher order spectral features for emotion and stress recognition from natural speech. *Applied Soft Computing*. 2017. vol. 56. pp. 217–232.
15. Kaya H., Karpov A., Salah A. Robust Acoustic Emotion Recognition based on Cascaded Normalization and Extreme Learning Machines. Proceedings of the 13th International Symposium on Neural Networks. 2016. LNCS 9719. pp. 115–123.
16. Budkov V., Vatamaniuk I., Basov V., Volf D. Investigation of Speech Signal Parameters Reflecting the Truth of Transmitted Information. Proceedings of the 18th International Conference on Speech and Computer (SPECOM 2016). 2016. LNAI 9811. pp. 419–426.
17. Vorobiev V.I. et al. [Cryptographic Standards Research and Selection on the Basis of Document Intelligent Analysis]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*. vol 5(48). 2016. pp. 69–87. (In Russ.).
18. Kharlamov A.A. *Sposob formirovaniya smyslovogo portreta teksta i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [The semantic text portrait building method and the device implementing it]. Patent RF. no. 2000127135. (In Russ.).

19. Poncet J. et al. Access by content based computer system. US Patent. no. WO 2001033419 A2. 2003.
20. Sheth A., Avant D., Bertram C. System and method for creating a semantic web and its applications in browsing, searching, profiling, personalization and advertising. US Patent. no. WO 2001069428 A1. 2001.
21. Omoigui N. System and method for knowledge retrieval, management, delivery and presentation. US Patent no. 20100070448 A1. 2003.
22. Gardner S. Ontology-based information management system and method. US Patent. no. 7225183 B2. 2007.
23. Hovanov N.V. [Complex objects estimation in conditions of lack of information]. *Trudy 8-y mezhdunarodnoy nauchnoy shkoly "Modelirovanie i analiz bezopasnosti i riska v slozhnykh sistemah"* [Proceedings of the 8th international scientific school "Security and risk modeling and analysis in complex systems"]. SPb.: IPMASHHRAN. 2008. pp. 18–28. (In Russ.).
24. Perminov S.V., Afanasyev S.V [Semantic Method of Information Anomaly Search via Web]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*. 2006. vol. 3. Issue 1. pp. 279–287. (In Russ.).
25. Perminov S.V. [Semantic search system]. *Informatsionno-izmeritelnye i upravlyayushchie sistemy – Information-measuring and Control Systems*. 2008. vol. 4. Issue 6. pp. 45–50. (In Russ.).
26. Narinyani A.S. [Centaurus named TEON: Thesaurus + Ontology]. *Trudy mezhdunarodnogo seminar Dialog'2001 po kompyuternoy lingvistike i ee prilozheniyam* [Proceedings of the international workshop Dialog'2001 on computer linguistics and its applications]. 2001. vol. 1. pp. 184–188. (In Russ.).
27. Ferrara E. et al. Predicting online extremism, content adopters, and interaction reciprocity. *Proceedings of the 8th International Conference on Social Informatics*. 2016. Part II. pp. 22–39.

В.Г. АСТАФУРОВ, А.В. СКОРОХОДОВ
**ФОРМИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ИНФОРМАТИВНЫХ
КЛАССИФИКАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ РЕШЕНИИ
ЗАДАЧИ КЛАССИФИКАЦИИ ОБЛАЧНОСТИ ПО
СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ MODIS**

Астафуров В.Г., Скороходов А.В. **Формирование системы информативных классификационных характеристик при решении задачи классификации облачности по спутниковым данным MODIS.**

Аннотация. Предложен алгоритм формирования системы эффективных классификационных характеристик, основанный на концепции усеченного перебора и использовании информации об индивидуальных показателях классификации при выборе гранул. Его вычислительная эффективность обеспечивается применением операций простого сравнения результатов классификации отдельных классов при выборе наиболее информативной гранулы на очередной итерации и использованием технологии параллельных вычислений на графических процессорах.

Рассмотрены известные методы усеченного перебора для формирования систем эффективных классификационных характеристик. Обсуждаются результаты поиска информативных признаков на примере решения задачи классификации облачности на основе применения вероятностной нейронной сети и информации о текстуре спутниковых снимков MODIS. Представлено описание используемого классификатора и статистического подхода к описанию текстуры изображений.

Определены наиболее эффективные классификационные характеристики облачности путем сравнения комбинаций текстурных признаков, полученных с помощью методов усеченного перебора. Показаны результаты исследования динамики изменения оценки правильно проклассифицированных образцов при выполнении различных алгоритмов поиска информативных признаков. Установлено, что разработанный в данной работе метод позволяет уменьшить разброс значений вероятности правильной классификации отдельных классов.

Ключевые слова: информативность, классификация, нейронная сеть, облачность, параллельные вычисления, текстурные признаки, усеченный перебор.

1. Введение. Эффективность решения задачи классификации зависит от успешного выполнения нескольких этапов. На первом из них формализуется классификационная модель и формируется репрезентативная обучающая выборка, состоящая из характерных образцов исследуемых объектов классификации. Второй этап заключается в выборе признаков для их описания и в формировании системы информативных классификационных характеристик. На третьем этапе осуществляется выбор типа классификатора и его настройка. Достоверность результатов классификации оценивается на основе тестовой выборки. Информативность используемых признаков описания объектов зависит не только от выбранного классификатора, но и от значений его параметров [1]. Поэтому целесообразно объединение и совместное выполнение второго и третьего этапов

решения задачи классификации. Таким образом, система эффективных классификационных характеристик выступает связующим элементом между экспертным представлением классификационной модели и ее математической интерпретацией, реализуемой с помощью методов интеллектуального анализа данных. При этом использование наиболее информативных признаков позволяет сократить время выполнения алгоритмов классификации и повысить их надежность.

Система классификационных характеристик называется оптимальной, если ее применение позволяет достигнуть наилучших результатов классификации тестовой выборки на основе выбранного классификатора. При этом существует глобальное и локальное решение задачи поиска информативных признаков. Глобальная оптимальная система классификационных характеристик может быть сформирована путем полного перебора всех возможных комбинаций исследуемых признаков и оценки достоверности классификации. Однако такой подход наиболее трудоемкий и применим только к признаковым пространствам небольшой размерности [2]. Остальные алгоритмы формирования системы эффективных классификационных характеристик приводят к локальному решению, поскольку рассматривают ограниченное количество их комбинаций. Наилучшую производительность демонстрируют методы определения информативности признаков, основанные на использовании статистических характеристик, таких как корреляция между ними [3] или энтропия их комбинаций [4]. Главным недостатком такого подхода является то, что при формировании на его основе системы эффективных характеристик не учитывается достоверность результатов классификации. Поэтому, например, система некоррелированных признаков может содержать и неинформативные характеристики. Таким образом, этот подход является эффективным только лишь для сокращения размерности пространства признаков. Оптимальными по соотношению производительности и информативности системы классификационных характеристик могут быть сформированы на базе алгоритмов усеченного перебора, основанных на пошаговых процедурах улучшения результатов классификации.

К наиболее известным методам усеченного перебора относятся: Addition (Ad) [5], Deletion (Del) [6], комбинированный алгоритм AdDel [7] и его модификация GRAD [8]. Отличительной особенностью последних двух алгоритмов является то, что они позволяют одновременно сформировать системы эффективных классификационных характеристик и определить их оптимальное количество, при котором получаются наилучшие результаты

классификации. При этом переборные методы универсальны и могут применяться практически для любого алгоритма классификации [1]. Формирование системы информативных признаков с помощью методов усеченного перебора позволяет подобрать значения параметров классификаторов: количество нейронов (сети Кохонена), уровень соседства (алгоритм N -ближайших соседей), экспоненциальный вес (метод нечетких C -средних) и другие. К основным недостаткам методов усеченного перебора относятся: значительное снижение производительности при увеличении размерности пространства признаков и флуктуации результатов классификации отдельных классов при изменении параметров перебора.

В работе рассматриваются результаты разработки и исследования универсального высокопроизводительного алгоритма для формирования системы эффективных классификационных характеристик, основанного на методе усеченного перебора для решения задачи классификации облачности по спутниковым снимкам MODIS и его сравнение с существующими аналогами в данной области.

2. Исходные данные. В настоящее время задача классификации облачности по спутниковым данным по-прежнему является актуальной ввиду отсутствия ее решений в полном объеме. В существующих работах облака на изображениях из космоса надежно классифицируются только по 10-14 разновидностям [9-12], к которым относятся 10 основных форм облачности и несколько их подтипов. При этом в соответствии с метеорологическим стандартом [13] облака на наземных и судовых метеостанциях классифицируются по 27 разновидностям. В [1] нами показана возможность распознавания 25 сигнатур облачности с вероятностью правильной классификации (ВПК) 0,72 на основе использования вероятностной нейронной сети и информации о текстуре спутниковых снимков MODIS с пространственным разрешением 250 м в видимом диапазоне спектра (0,62-0,67 мкм), полученных в дневное время и при отсутствии снежного покрова. Однако алгоритм может быть адаптирован к данным и других спутниковых систем, учитывая их пространственное разрешение. Применение алгоритма Ad позволило не только сформировать систему эффективных классификационных характеристик, но и подобрать параметр сглаживания функции Гаусса. Однако при анализе результатов обработки тестовой выборки было установлено, что ВПК отдельных типов облаков изменяется от 0,16 до 1. При этом надежно выделяются только 11 разновидностей облачности с ВПК более 0,7. На рисунке 1 показан пример получаемых нами результатов классификации облаков по спутниковому снимку MODIS территории Греции от 14.09.2008 г. (UTC – 11:55).

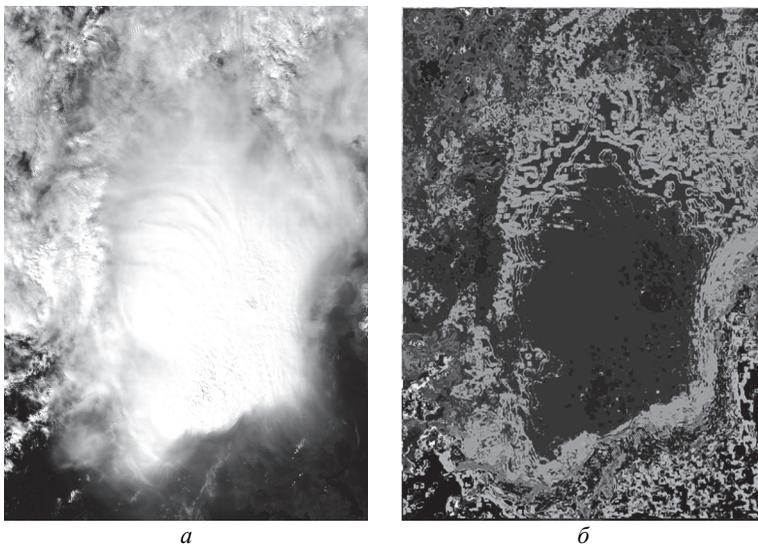


Рис. 1. Результаты классификации облачности по спутниковому снимку MODIS

Обучающая выборка сформирована с помощью методики сопоставления архивных данных сети наземных метеостанций со спутниковой съемкой MODIS и состоит из фрагментов характерных изображений 25 разновидностей облаков и двух типов подстилающей поверхности размером 21×21 пиксель [1]. При этом использовались метеонаблюдения, при которых фиксировалась только однослойная облачность или облака вертикального развития. Описание изображений облачности основано на статистических методах текстурного подхода, согласно которым анализируется пространственная взаимозависимость яркостей соседних пикселей: Gray-Level Co-occurrence Matrix (GLCM) [14], Gray-Level Difference Vector (GLDV) [15], Sum And Difference Histogram (SADH) [16] и One-Dimensional Signal Histogram (ODSH) [17]. Для уменьшения вычислительной сложности методов и снижения размерности матриц смежности (GLCM), векторов различия (GLDV), гистограмм сумм и разностей (SADH) применяется квантование яркостей на 20 уровней. При определении смежных пар пикселей учитываются угловые направления 0° , 45° , 90° и 135° . Поэтому полная система рассматриваемых в данной работе текстурных характеристик состоит из $N = 132$ признаков, которые приведены в таблице 1. Здесь группы из четырех одноименных признаков отличаются угловыми направлениями.

Таблица 1. Текстурные признаки для описания спутниковых снимков облачности

Обозначение	Текстурный признак	Обозначение	Текстурный признак
<i>GLCM</i>		$T_{73} - T_{76}$	Энтропия
$T_1 - T_4$	Второй угловой момент	$T_{77} - T_{80}$	Локальная однородность
$T_5 - T_8$	Энтропия	$T_{81} - T_{84}$	Контраст
$T_9 - T_{12}$	Максимальная вероятность	$T_{85} - T_{88}$	Кластерное затенение
$T_{13} - T_{16}$	Локальная однородность	$T_{89} - T_{92}$	Кластерная рельефность
$T_{17} - T_{20}$	Инверсия	<i>SADH</i>	
$T_{21} - T_{24}$	Дисперсия	$T_{93} - T_{96}$	Математическое ожидание
$T_{25} - T_{28}$	Контраст	$T_{97} - T_{100}$	Стандартное отклонение
$T_{29} - T_{32}$	Суммарное среднее	$T_{101} - T_{104}$	Второй угловой момент
$T_{33} - T_{36}$	Суммарная дисперсия	$T_{105} - T_{108}$	Контраст
$T_{37} - T_{40}$	Суммарная энтропия	$T_{109} - T_{112}$	Корреляция
$T_{41} - T_{44}$	Дифференциальная дисперсия	$T_{113} - T_{116}$	Энтропия
$T_{45} - T_{48}$	Дифференциальная энтропия	$T_{117} - T_{120}$	Локальная однородность
$T_{49} - T_{52}$	Корреляция	$T_{121} - T_{124}$	Кластерное затенение
$T_{53} - T_{56}$	Информационная мера -1	$T_{125} - T_{128}$	Кластерная рельефность
$T_{57} - T_{60}$	Информационная мера -2	<i>ODSH</i>	
<i>GLDV</i>		T_{129}	Первый начальный момент
$T_{61} - T_{64}$	Математическое ожидание	T_{130}	Энтропия
$T_{65} - T_{68}$	Стандартное отклонение	T_{131}	Энергия
$T_{69} - T_{72}$	Второй угловой момент	T_{132}	Вариация

В качестве классификатора применялась вероятностная нейронная сеть, преимуществами которой являются: возможность моделирования решающего правила практически любой сложности; фактическое отсутствие процедуры обучения; наличие единственного сглаживающего параметра функции активации σ и вероятностная интерпретация выходного отклика [18]. Основным недостатком такого типа сетей заключается в необходимости хранения

информации обо всей обучающей выборке в ее структуре, что обуславливает низкую производительность таких классификаторов. Однако простота и небольшое число используемых математических операций при их моделировании и применение технологии параллельных вычислений на графических процессорах NVIDIA CUDA нивелирует указанный недостаток [19].

Вероятностная нейронная сеть состоит из трех вычислительных слоев. Первый из них включает 5400 нейронов-образцов для каждой разновидности облачности и типа подстилающей поверхности в соответствии с объемом обучающей выборки. Откликами нейронов этого слоя являются значения уровней активности образцов. При этом для активации нейронов используется функция Гаусса. Второй слой сети содержит 27 нейронов-сумматоров по числу распознаваемых типов облачности и подстилающей поверхности. Отклики нейронов этого слоя представляют собой рассчитанные значения уровней активности каждого класса. Для их вычисления применяется функция Парзена, зависящая только от суммарных откликов нейронов предыдущего слоя для соответствующего класса. Выходной слой сети состоит из одного нейрона-консеквента, откликом которого является номер класса с наибольшим значением уровня активности. Архитектура вероятностной нейронной сети делает возможным ее реализацию в качестве функции-ядра при использовании технологии NVIDIA CUDA [20]. Использование методов параллельных вычислений существенно повышает эффективность алгоритмов усеченного перебора формирования систем информативных классификационных характеристик, описание которых представлено в следующем разделе данной работы.

3. Методы усеченного перебора. В основе всех методов усеченного перебора лежит итерационный подход, на каждом шаге которого ищется локальное оптимальное решение из ограниченной области. При этом общее количество проверяемых комбинаций признаков получается на несколько порядков меньше, чем при использовании метода полного перебора. Однако рассматриваемый подход может и не дать глобального оптимального решения, но полученный результат будет максимально приближен к нему. Таким образом, основной задачей при разработке методов усеченного перебора является повышение эффективности процедуры поиска локальных оптимальных решений путем выбора способа формирования комбинаций признаков и критериев их отбора. На данный момент известно несколько алгоритмов, реализующих данный подход: Ad [5], Del [6], AdDel [7] и GRAD [8]. Сравнение методов

усеченного перебора осуществлялось на тестовом наборе, состоящем из $N_T = 1350$ фрагментов различных разновидностей облачности и подстилающей поверхности, не включенных в обучающую выборку.

Алгоритм Ad базируется на последовательном переборе и добавлении наиболее информативных признаков к тестируемому набору. Основная суть методики заключается в следующем:

1) имеется исходная система исследуемых характеристик $T_S = \{T_1, T_2, T_3, \dots, T_N\}$ и тестируемый набор $T_F = \emptyset$;

2) выполняется последовательный перебор признаков из T_S и их поочередное включение в T_F ;

3) после каждого добавления признака производится классификация тестовой выборки с использованием системы признаков T_F и рассчитывается оценка ВПК:

$$E = \frac{N_R}{N_T},$$

где N_R — число правильно проклассифицированных образцов;

4) наиболее эффективный признак по результатам сравнения E остается в наборе T_F , а из T_S исключается. Таким образом, число тестируемых признаков $|T_F|$ увеличивается на единицу;

5) шаги 2-4 повторяются для оставшихся $N-1$ характеристик из T_S . При этом существуют несколько критериев остановки алгоритма. Один из них заключается в прекращении добавления новых признаков, если они не позволяют повысить ВПК тестовой выборки, достигнутую на предыдущем шаге. Второй заключается в искусственном ограничении максимального числа классификационных характеристик в T_F . Согласно третьему варианту алгоритм Ad выполняется пока $T_S \neq \emptyset$, что позволяет оценить, как меняется достоверность классификации тестовой выборки при использовании наборов с различными значениями T_F .

Аналогом Ad является алгоритм Del с той лишь разницей, что при последовательном переборе наименее информативный признак исключается из тестируемого набора согласно следующей последовательности действий:

1) на начальном этапе тестируемый набор включает все исследуемые признаки $T_F = \{T_1, T_2, T_3, \dots, T_N\}$;

2) выполняется последовательный перебор характеристик из T_F и их поочередное удаление;

3) после каждого удаления признака проводится классификация тестовой выборки при использовании набора T_F и рассчитывается E ;

4) наименее информативная характеристика, при которой E принимает минимальное значение, удаляется из T_F и далее в переборе не участвует;

5) шаги 2-4 повторяются для оставшихся $N-1$ признаков из T_F . Критерии остановки аналогичны, что и в методе Ad: удаление характеристик не улучшает результаты классификации тестовой выборки, максимальное число информативных признаков в итоговой системе задается заранее, $T_F \neq \emptyset$.

Методика AdDel является комбинированной и основана на попеременном выполнении алгоритмов Ad и Del, которое устраняет их зависимость от выбора начального информативного или неинформативного признака соответственно. Например, наиболее эффективная характеристика, выбранная на первой итерации метода Ad, может и не попасть в итоговую систему информативных признаков. Алгоритм AdDel представляется в следующем виде:

1) на начальном этапе тестируемый набор $T_F = \emptyset$ и исследуемый $T_S = \{T_1, T_2, T_3, \dots, T_N\}$;

2) происходит выполнение алгоритма Ad и набираются N_A информативных признаков в T_F по результатам классификации тестовой выборки;

3) далее из полученного на шаге 2 тестируемого набора T_F методом Del исключается $N_D < N_A$ наименее эффективных характеристик;

4) шаги 2 и 3 повторяются для оставшихся $N - N_A + N_D$ признаков из T_S . Основные критерии остановки аналогичны таковым в методах Ad и Del. При этом наблюдения, отмеченные в [8], свидетельствуют о том, что при использовании алгоритма AdDel качество классификации вначале растет, а затем постепенно снижается за счет добавления малоинформативных признаков. Таким образом, можно определить оптимальное для данного метода число классификационных характеристик и использовать эту особенность в качестве критерия его остановки. В соответствии с практическими рекомендациями [8] число добавляемых N_A и удаляемых N_D

признаков инициализируется, как правило, в соотношении 2 к 1, что обеспечивает наибольшую эффективность метода AdDel.

Алгоритм GRAD является развитием AdDel, согласно которому в переборе участвуют уже не отдельные признаки, а некоторым образом сформированные их комбинации, называемые гранулами. Для их формирования прибегают к методу полного перебора, поскольку невозможно заранее оценить информативность того или иного сочетания исследуемых классификационных характеристик. При большом количестве исследуемых признаков следует ограничиваться двумя или тремя признаками. Основная же суть алгоритма GRAD заключается в следующем:

1) методом полного перебора формируются N_G гранул $T_G \subset T_S$, состоящих из заданного числа характеристик w ;

2) имеется исходная система исследуемых признаков $T_S = \{T_1, T_2, T_3, \dots, T_N\}$ и тестируемый набор $T_F = \emptyset$;

3) в тестируемый набор поочередно добавляются гранулы, сформированные на шаге 1. При этом обязательным условием является отсутствие любой характеристики из текущей гранулы в тестируемой подсистеме T_F ;

4) после каждого добавления гранулы проводится классификация тестовой выборки при использовании набора T_F и оценивается ее ВПК;

5) признаки наиболее информативной гранулы остаются в подсистеме T_F , а из T_S исключаются;

6) шаги 3-5 повторяются в соответствии с заданным заранее числом добавляемых гранул N_G ;

7) происходит включение стандартного алгоритма Del, в результате выполнения которого удаляется N_D наименее эффективных характеристик из T_F ;

8) Шаги 3-7 повторяются для оставшихся $N - w \times N_G + N_D$ признаков. Критерии остановки идентичны таковым в методе AdDel. Вследствие возможного большого числа исследуемых классификационных характеристик N прибегают к сокращению количества используемых гранул. Для этого оценивают информативность каждой гранулы на этапе их формирования по результатам классификации тестовой выборки и в дальнейшем используют только наиболее эффективные из них (определенный процент от общего числа).

Соотношение же количества добавляемых и удаляемых характеристик является аналогичным, что и для метода AdDel.

В данной работе предлагается алгоритм являющийся развитием метода GRAD, основанный на учете индивидуальных показателей эффективности классификации отдельных классов, сокращенно GRAD-II (Individual Informativeness). Основная идея этого метода заключается в использовании гранул «способных» улучшить результаты классификации как можно большего числа рассматриваемых классов. Тем самым формируемая система эффективных классификационных характеристик, возможно, позволит не только повышать общую достоверность классификации, но и уменьшать разброс индивидуальных показателей распознавания рассматриваемых классов. Алгоритм GRAD-II имеет следующий вид:

1) методом полного перебора формируется N_G гранул $T_G^{(j)} \subset T_S$ при $j = 1, 2, \dots, N_G$, состоящих из заданного числа характеристик w ;

2) оцениваются общая ВПК $E(T_G^{(j)})$ и результаты классификации каждого из $i = 1, 2, \dots, K$ рассматриваемых классов $E_i(T_G^{(j)})$ на основе тестовой выборки путем использования каждой гранулы $T_G^{(j)}$, сформированной на шаге 1;

3) при инициализации процедуры перебора в тестируемый набор T_F добавляется наиболее информативная гранула $T_G^{(j)}$, а исследуемая система признаков $T_S = \{T_1, T_2, T_3, \dots, T_N\}$ за исключением характеристик из T_F ;

4) производится поиск гранулы «способной» улучшить результаты классификации как можно большего числа рассматриваемых классов путем сравнения индивидуальных значений ВПК $E_i(T_F)$ и $E_i(T_G^{(j)})$ при $j = 1, 2, \dots, N_G - 1$:

$$H_j = \sum_{i=1}^K \begin{cases} 1, & \text{если } E_i(T_F) < E_i(T_G^{(j)}) \\ 0, & \text{в остальных случаях} \end{cases}$$

При этом рассматриваются только те комбинации признаков, для которых $T_G^{(j)} \subset T_S$. Таким образом, гранулы, в которых хотя бы один из признаков входит в T_F , из процедуры поиска исключаются;

5) комбинация с наибольшим значением H_j добавляется в тестируемый набор T_F , а соответствующие ей признаки удаляются из T_S ;

6) проводится оценка результатов классификации при использовании T_F как общих $E(T_F)$, так и индивидуальных $E_i(T_F)$ оценок;

7) шаги 4-6 повторяются в соответствии с заданным заранее числом добавляемых гранул N_G ;

8) происходит включение стандартного алгоритма Del, в результате выполнения которого удаляется N_D наименее эффективных характеристик из T_F ;

9) шаги 4-8 повторяются для оставшихся $N - w \times N_C + N_D$ признаков. Критерии остановки и соотношение числа добавляемых и удаляемых характеристик идентичны таковым в методе GRAD. Вычислительная эффективность алгоритма GRAD-II достигается за счет выбора наилучшей гранулы путем простого сравнения индивидуальных показателей качества, проводимого на шаге 4, без использования процедуры классификации. При этом предварительная обработка, связанная с формированием гранул и расчетом значений ВПК отдельных классов, занимает практически одинаковое время, что и в методе GRAD.

4. Сравнительный анализ результатов поиска информативных признаков. Сравнение алгоритмов поиска эффективных классификационных характеристик, изложенных в предыдущем разделе, проводилось на примере решения задачи классификации облачности по спутниковым снимкам MODIS с использованием вероятностной нейронной сети и информации о текстуре изображений. Информативность сформированных комбинаций признаков оценивалась по результатам классификации тестовой выборки, состоящей из 1350 фрагментов спутниковых снимков 25 разновидностей облаков. При этом варьировался не только параметр сглаживания функции Гаусса σ , но и число добавляемых N_A и удаляемых N_D в методах AdDel, GRAD и GRAD-II характеристик.

На рисунке 2 показано влияние параметра σ на результаты классификации облачности при использовании метода Ad для формирования системы эффективных классификационных характеристик. Из рисунка 1 видно, что наиболее информативная комбинация признаков получена при $\sigma = 0,02$, что соответствует значению оценки ВПК $E = 0,713$. По мере увеличения параметра σ ВПК уменьшается и стабилизируется на уровне $E = 0,55$. Поэтому при анализе остальных методов поиска эффективных

классификационных характеристик значения $\sigma > 0,1$ не использовались. На рисунке 3 показаны результаты классификации тестовой выборки для различных значений тестируемых признаков $|T_F|$. Здесь и далее m обозначает номер итерации используемого метода усеченного перебора. Максимальное значение оценки ВПК достигается при $|T_F| = 30$. Следует отметить, что наибольший рост E наблюдается в интервале значений $|T_F|$ от 1 до 10. Добавленные при этом текстурные признаки обладают высокой информативностью. Далее в интервале от 10 до 30 качество классификации повышается незначительно, что свидетельствует о добавлении в систему малоинформативных признаков. При $|T_F| > 30$ к тестируемому набору присоединяются «шумовые» характеристики текстуры, о чем свидетельствует уменьшение оценки E для тестовой выборки.

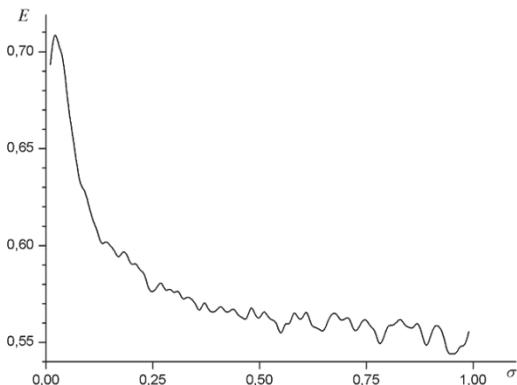


Рис. 2. Зависимость результатов классификации от параметра сглаживания

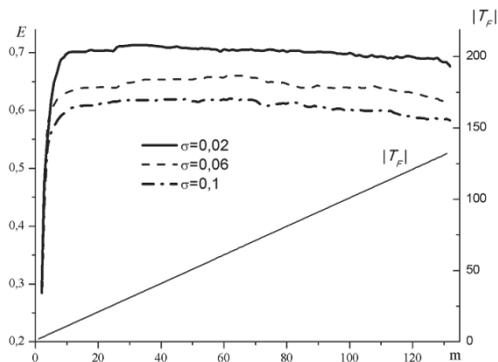


Рис. 3. Зависимость результатов классификации и числа тестируемых текстурных признаков для метода Ad

На рисунке 4 показаны результаты классификации тестовой выборки при различных значениях $|T_F|$ для алгоритма Del. Наибольшая ВПК $E = 0,705$ достигается при $|T_F| = 22$. Удаление «шумовых» признаков приводит к медленному росту E . Дальнейшее исключение малоинформативных характеристик влечет постепенное ухудшение оценки ВПК при $10 < |T_F| < 22$. Наиболее эффективные текстурные признаки удаляются, начиная с $|T_F| = 10$. Таким образом, алгоритмами Ad и Del достигнуты схожие результаты классификации тестовой выборки как по количеству информативных признаков, так и по динамике изменения оценки ВПК E .

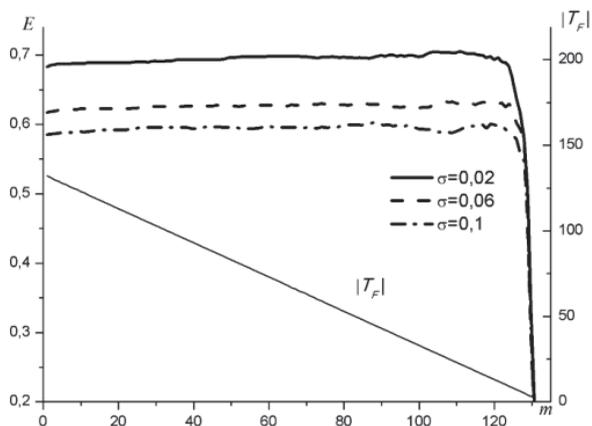


Рис. 4. Зависимость результатов классификации и числа тестируемых текстурных признаков для метода Del

Формирование систем информативных текстурных признаков путем применения метода AdDel проводилось при различном числе добавляемых N_A и удаляемых N_D признаков в соотношении 2 к 1. Наилучшие результаты классификации тестовой выборки, которые показаны на рисунке 5, были достигнуты при $N_A = 10$ и $N_D = 5$. При этом оценка ВПК $E = 0,716$ при $|T_F| = 25$. В общем случае изменение параметров N_A и N_D кардинальным образом не влияет на общую динамику оценки E , стабилизация которой происходит уже при

$|T_F| > 10$. По аналогии с методом Ad дальнейшее увеличение числа тестируемых признаков в T_F приводит вначале к медленному росту E , а затем к постепенному уменьшению этого показателя.

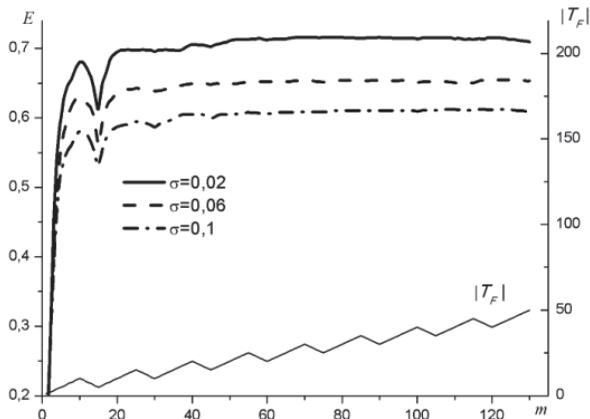


Рис. 5. Зависимость результатов классификации и числа тестируемых текстовых признаков в тестируемом наборе при использовании метода AdDel

Анализ результатов классификации тестовой выборки при использовании метода GRAD проводился путем варьирования не только числа удаляемых признаков N_D и добавляемых гранул N_C , но и их размеров w . Поскольку число исследуемых в работе текстовых признаков $N = 132$ достаточно велико, то рассматривались только двумерные ($w = 2$) и трехмерные ($w = 3$) комбинации классификационных характеристик. На рисунке 6 показаны наилучшие результаты обработки тестовой выборки, полученные при $N_C = 1$, $N_D = 1$ и $w = 2$. При этом была достигнута оценка ВПК $E = 0,721$ при $|T_F| = 25$. Как видно из рисунка 6, процесс увеличения E стабилизируется начиная с $|T_F| = 14$, что незначительно превосходит аналогичный показатель в методах Ad, Del и AdDel, что, видимо, связано с тем, что в T_F добавляются не отдельные признаки, а их комбинации. В остальном динамика изменения E типична в сравнении с рассмотренными алгоритмами.

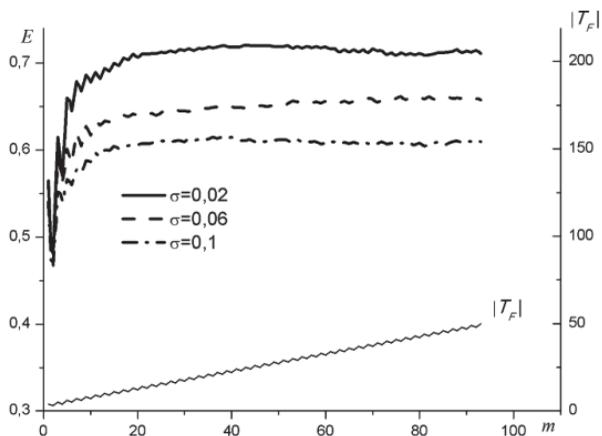


Рис. 6. Зависимость результатов классификации и числа тестируемых признаков для GRAD

Оценка результатов работы предложенного алгоритма формирования системы эффективных классификационных характеристик GRAD-II осуществлялась по схожей методике, что и при использовании GRAD: варьировалось число удаляемых признаков N_D и добавляемых гранул N_C , а также их размер w . Кроме того, проверена гипотеза о применении только наиболее информативных гранул при реализации алгоритма. На рисунке 7 показаны наилучшие результаты классификации тестовой выборки при использовании метода GRAD-II, достигнутые при $N_C = 3$, $N_D = 3$ и $w = 2$. При этом оценка ВПК составила $E = 0,724$ при $|T_F| = 44$. Рассмотрение только наиболее информативных гранул ухудшает результаты классификации до $E = 0,718$ при $|T_F| = 37$, $N_C = 4$, $N_D = 8$ и $w = 3$. Из рисунка 7 видно, что динамика изменений оценки ВПК E отличается от рассмотренных выше алгоритмов. При увеличении числа информативных признаков в T_F с 2 до 10 наблюдается значительный рост E . Дальнейшее добавление гранул в тестируемый набор постепенно повышает качество классификации, доходя до максимального значения E при значительном большем числе тестируемых признаков $|T_F|$, чем в других алгоритмах. При этом наблюдается сильная неравномерность изменения оценки ВПК, что предположительно связано с тем, что гранулы добавляются на

основании индивидуальных показателей достоверности $E_i(T_G^{(j)})$, а не общей ВПК E .

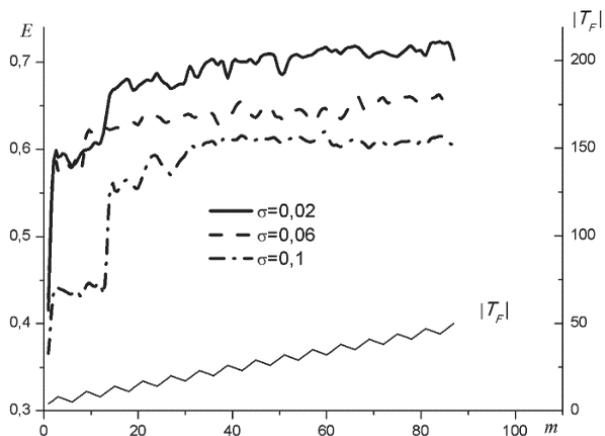


Рис. 6. Зависимость результатов классификации и числа тестируемых текстуальных признаков для метода GRAD-II

Результаты применения методов усеченного перебора обобщены в таблице 2, из которой видно, что наиболее информативная система классификационных характеристик получена с помощью алгоритма GRAD-II. Оценка ВПК для тестовой выборки, достигнутая при использовании наихудшего набора, сформированного на основе метода Del, меньше на 0,02, что свидетельствует о схожей эффективности рассмотренных методов усеченного перебора. Можно предположить, что и оптимальная система классификационных характеристик, полученная путем полного перебора, позволит получить сравнимое значение оценки ВПК. Следует отметить, что наименьшее время формирования наборов информативных признаков t при использовании графического процессора GeForce GTX 780 достигается также при использовании алгоритма GRAD-II, поскольку выбор гранул происходит путем простого сравнения оценок ВПК отдельных типов облачности $E_i(T_F)$ и $E_i(T_G^{(j)})$. При этом процедура формирования самих гранул занимает практически одинаковое время в методах GRAD и GRAD-II. Число классификационных характеристик, подобранных методом GRAD-II по сравнению с другими алгоритмами усеченного перебора максимально. Из рисунков 3-7

видно, что при значениях $|T_F| > 10$, ВПК тестовой выборки увеличивается менее чем на 0,05.

Таблица 2. Результаты формирования наборов информативных признаков

	<i>Ad</i>	<i>Del</i>	<i>AdDel</i>	<i>GRAD</i>	<i>GRAD-II</i>
E	0,713	0,705	0,716	0,721	0,724
$ T_F $	30	22	25	25	44
t, c	$7,2 \times 10^3$	$7,2 \times 10^3$	$7,5 \times 10^3$	$15,2 \times 10^3$	$2,9 \times 10^3$
σ	0,02				0,03

Полученная на основе алгоритма GRAD-II система информативных текстурных признаков позволила уменьшить разброс значений ВПК отдельных типов облачности от $\min_i E_i(T_F) = 0,16$ и $\max_i E_i(T_F) = 1$ (метод Ad) до $\min_i E_i(T_F) = 0,37$ и $\max_i E_i(T_F) = 0,85$, что свидетельствует об эффективности предложенного подхода, учитывающего индивидуальные показатели классификации. Вопрос о том, какой из наборов информативных признаков является предпочтительным для решения задач многоклассовой классификации [21], с малым или большим разбросом значений вероятности правильного распознавания отдельных классов, остается открытым и требует дальнейшего рассмотрения.

Сравнивая наборы эффективных классификационных характеристик, сформированные путем применения рассматриваемых в работе методов перебора, можно выделить наиболее информативные текстурные признаки, которые входят во все эти наборы:

- информационная мера-1, вычисляемая для углового направления 90° по методу GLCM;
- математическое ожидание 90° (GLDV);
- стандартное отклонение 135° (GLDV);
- второй угловой момент 90° (GLDV);
- кластерное затенение 45° (GLDV);
- первый начальный момент (ODSH).

Следует отметить, что $2/3$ указанных текстурных признаков добавлялись в тестируемую комбинацию T_F одними из первых, обеспечивая наибольший прирост значений E . Наименее информативными классификационными характеристиками, которые не вошли ни в одну из сформированных систем, является большинство текстурных признаков, рассчитываемых по методу SADH.

5. Заключение. Предложен универсальный алгоритм формирования системы эффективных классификационных

характеристик GRAD-II, основанный на концепции усеченного перебора и использовании информации об индивидуальных показателях классификации отдельных классов $E_i(T_G^{(j)})$ при выборе гранул. Вычислительная эффективность разработанного метода обеспечивается применением операций простого сравнения $E_i(T_G^{(j)})$ и $E_i(T_F)$ при выборе наиболее информативной гранулы на очередной итерации без выполнения процедуры классификации.

Проведен сравнительный анализ алгоритмов формирования наборов эффективных классификационных характеристик применительно к задаче классификации облачности на основе использования вероятностной нейронной сети и информации о текстуре облаков на спутниковых снимках MODIS. Установлено, что применение рассмотренных в работе методов поиска информативных признаков позволило достигнуть схожих результатов классификации тестовой выборки (таблица 2). Можно предположить, что использование алгоритма полного перебора позволит незначительно улучшить достигнутые нами результаты классификации. На основании рисунков 3-7 выявлены три стадии изменения оценки ВПК: наибольшего прироста ($|T_F| < 10$), стабилизации ($10 < |T_F| < 30$) и последующего уменьшения E ($|T_F| > 30$). Также установлено, что применение разработанного алгоритма GRAD-II позволило уменьшить разброс значений ВПК отдельных типов облачности от $\min_i E_i(T_F) = 0,16$ и $\max_i E_i(T_F) = 1$ (метод Ad) до $\min_i E_i(T_F) = 0,37$ и $\max_i E_i(T_F) = 0,85$.

Все наборы эффективных классификационных характеристик, полученные различными методами усеченного перебора, содержат 6 общих наиболее информативных текстурных признаков: информационная мера-1 135° (GLCM); математическое ожидание 90° (GLDV); стандартное отклонение 135° (GLDV); второй угловой момент 90° (GLDV); кластерное затенение 45° (GLDV); первый начальный момент (ODSH). При этом 2/3 из них добавлялись в тестируемую систему T_F на стадии наибольшего прироста E . Поэтому эти характеристики текстуры формируют «информативное ядро», которое вносит наибольший вклад в результаты классификации тестовой выборки. При этом большинство признаков, рассчитываемых методу SADH, следует отнести к неинформативным, поскольку они не вошли ни в одну из систем эффективных классификационных характеристик.

Алгоритмы на основе методов усеченного перебора представляют собой эффективный инструмент для формирования наборов информативных признаков близких к оптимальному, являются универсальными и могут использоваться совместно практически с любым классификатором. Вычислительная эффективность рассмотренных методов обеспечивается пошаговым улучшением результатов классификации за счет выбора наиболее информативных признаков и может быть повышена путем использования технологии параллельных вычислений NVIDIA CUDA.

Литература

1. *Астафуров В.Г., Курьянович К.В., Скорыходов А.В.* Методы автоматической классификации облачности по спутниковым снимкам MODIS // Исследование Земли из космоса. 2016. № 4. С. 35–45.
2. *Загоруйко Н.Г.* Методы распознавания и их применение // М.: Изд-во «Советское радио». 1972. 208 с.
3. *Астафуров В.Г., Скорыходов А.В.* Сегментация спутниковых снимков облачности по текстурным признакам на основе нейросетевых технологий // Исследование Земли из космоса. 2011. № 6. С. 10–20.
4. *Bankert R.L.* Cloud classification of AVHRR imagery in maritime regions using a probabilistic neural network // J. Appl. Meteor. 1994. vol. 33. pp. 909–918.
5. *Барабаш Ю.Л., Варский Б.В., Зиновьев В.Т.* Автоматическое распознавание образов // Киев: Изд-во КВАНУ. 1963. 173 с.
6. *Merill T., Green O.M.* On the effectiveness of receptions in recognition systems // IEEE Trans. Inform. Theory. 1963. vol. IT-9. pp. 11–17.
7. *Кутин Г.И.* Методы ранжировки комплексов признаков. Обзор // Зарубежная радиоэлектроника. 1981. № 9. С. 54–70.
8. *Загоруйко Н.Г.* Когнитивный анализ данных // Новосибирск: Академическое издательство ГЕО. 2013. 186 с.
9. *Jin W., Gong F., Zeng X., Fu R.* Classification of clouds in satellite imagery using adaptive fuzzy sparse representation // Sensors. 2016. vol. 16. no. 12. pp. 2153.
10. *Hiroshi S., Takahito I., Kouki M.* High-resolution cloud analysis information derived from Himawari-8 data // Meteorological satellite center technical note. 2016. vol. 61. pp. 43–51.
11. *Tapakis R., Charalambides A.G.* Equipment and methodologies for cloud detection and classification: A review // Solar Energy. 2013. vol. 95. pp. 392–430.
12. *Волкова Е.В.* Оценки параметров облачного покрова, осадков и опасных явлений погоды по данным радиометра AVHRR с МИСЗ серии NOAA круглосуточно в автоматическом режиме // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 3. С. 66–74.
13. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). Код для оперативной передачи данных приземных метеорологических наблюдений с сети станций Росгидромета // М.: «Триада. лтд». 2013. 79 с.
14. *Haralick R.M., Shanmugam K., Dinstein I.* Textural features for image classification // IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. 1973. vol. SMC–3. no. 6. pp. 610–621.
15. *Weszka J.S., Dyer C.R., Rosenfeld A.* A comparative study of texture measures for terrain classification // IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics. 1976. vol. SMC–6. no. 4. pp. 269–285.

16. *Unser M.* Sum and difference histograms for texture classification // IEEE Transaction on Systems, Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1986. vol. PAMI–8. no. 1. pp. 118–125.
17. *Колодникова Н.В.* Обзор текстурных признаков для задач распознавания образов // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2004. Т. 9. № 1. С. 113–124.
18. *Specht D.F.* Probabilistic neural networks // Neural Networks. 1990. vol. 3. pp. 109–118.
19. *Savchenko A.V.* Pattern recognition and increasing of the computational efficiency of a parallel realization of the probabilistic neural network with homogeneity testing // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). 2013. vol. 22. no. 2. pp. 184–192.
20. *Скороходов А.В., Аксёнов С.В., Аксёнов А.В., Лайком Д.Н.* Использование различных вычислительных систем для решения задачи автоматической классификации облачности по спутниковым данным MODIS на основе вероятностной нейронной сети // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2016. Т. 327. № 1. С. 30–38.
21. *Student S., Pieter J., Fajarewicz K.* Multiclass classification problem of large-scale biomedical meta-data // Procedia Technology. 2016. vol. 11. pp. 938–945.

Астафуров Владимир Глебович — д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры автоматизированных систем управления, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР), старший научный сотрудник группы атмосферной акустики, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук (ИОА СО РАН). Область научных интересов: разработка статистических методов анализа данных при решении задач классификации и распознавания образов. Число научных публикаций — 125. astafurov@iao.ru; пл. Академика Зуева, 1, Томск, 634055; р.т.: +7(3822)49-22-56, Факс: +7(3822)49-20-86.

Скороходов Алексей Викторович — к-т техн. наук, научный сотрудник группы атмосферной акустики, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук (ИОА СО РАН). Область научных интересов: разработка алгоритмов интеллектуальной обработки данных дистанционного зондирования Земли из космоса с использованием технологии искусственных нейронных сетей, методов нечеткой логики и кластерного анализа. Число научных публикаций — 45. vazime@yandex.ru; пл. Академика Зуева, 1, Томск, 634055; р.т.: +7(3822)49-22-56, Факс: +7(3822)49-20-86.

Поддержка исследований. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-37-60019 мол_а_дк).

V.G. ASTAFUROV, A.V. SKOROKHODOV
**FORMATION OF A SET OF INFORMATIVE CLASSIFICATION
 FEATURES FOR SOLVING CLOUD CLASSIFICATION PROBLEM
 USING MODIS SATELLITE DATA**

Astafurov V.G., Skorokhodov A.V. **Formation of a Set of Informative Classification Features for Solving Cloud Classification Problem using MODIS Satellite Data.**

Abstract. An algorithm for the formation of a set of effective classification features, based on the truncated search concept and the use of the information about individual classification indicators in the granules selection, is proposed. Its computational efficiency is ensured by the use of simple comparison operations of classification results of individual classes when choosing the most informative granule at the next iteration and using the parallel computing technology on graphics processing units.

Known methods of the truncated selection for the formation of sets of effective classification features are considered. The results of the informative features search are discussed through the example of solving the cloud classification problem on the basis of the application of a probabilistic neural network and the texture information of MODIS satellite imagery. A description of the used classifier and the statistical approach to describing the texture of images is given.

The most effective cloud classification characteristics are determined by comparing the combinations of textural features obtained by truncated selection methods. The study results of the change dynamics in the correctly classified clouds estimation when performing various algorithms for informative features searching are shown. It is established that the method, developed in this paper, makes it possible to reduce the variance of probability values of the correct classification of individual classes.

Keywords: informative, classification, neural network, cloud, parallel computing, texture features, truncated select methods.

Astafurov Vladimir Glebovich — Ph.D., Dr. Sci., professor of automation and data processing department, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR), senior researcher of atmospheric acoustic division, V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS (IAO SB RAS). Research interests: statistical methods of data analysis in solution of classification and pattern recognition problems. The number of publications — 125. astafurov@iao.ru; 1, Academician Zuev square, Tomsk, 634055, Russia; office phone: +7(3822)49-22-56, Fax: +7(3822)49-20-86.

Skorokhodov Aleksey Victorovich — Ph.D., researcher of atmospheric acoustic division, V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS (IAO SB RAS). Research interests: development of algorithms for intellectual processing of remote sensing data from Earth observation using artificial neural networks technology, fuzzy logic methods and cluster analysis. The number of publications — 45. vazime@yandex.ru; 1, Academician Zuev square, Tomsk, 634055, Russia; office phone: +7(3822)49-22-56, Fax: +7(3822)49-20-86.

Acknowledgements. This research is supported by RFBR (grant 16-37-60019 mol_a_dk).

References

1. Astafurov V.G., Kuriyanovich K.V., Skorokhodov A.V. [Methods for automatic cloud classification from MODIS data]. *Issledovanie Zemli iz kosmosa – The study of the Earth from space*. 2016. no. 4. pp. 30–45. (In Russ.).
2. Zagorujko N.G. *Metody raspoznavaniya i ih primeneniye* [Detection Methods and Their Application]. Moscow: “Sovetskoe radio” Publ. 1972. 208 p. (In Russ.).

3. Astafurov V.G., Skorokhodov A.V. [Segmentation of satellite images by textural parameters based on neural network technologies]. *Issledovanie Zemli iz kosmosa – The study of the Earth from space*. 2011. vol. 6. pp. 10–20. (In Russ.).
4. Bankert R.L. Cloud classification of AVHRR imagery in maritime regions using a probabilistic neural network. *Journal of Applied Meteorology*. 1994. vol. 33. pp. 909–918.
5. Barabash Ju.L., Varskiy B.V., Zinov'ev V.T. *Avtomaticheskoe raspoznavanie obrazov* [Automatic recognition of images]. Kiev: “KVAIU” Publ. 1963. 173 p. (In Russ.).
6. Merrill T., Green O.M. On the effectiveness of receptions in recognition systems. *IEEE Transactions Information Theory*. 1963. vol. IT-9. pp. 11–17.
7. Kutin G.I. [Methods ranking of signs complexes. Review]. *Zarubezhnaja radioelektronika – International radioelectronics*. 1981. vol. 9. pp. 54–70. (In Russ.).
8. Zagorujko N.G. *Kognitivnyj analiz dannyh* [Cognitive data analysis]. Novosibirsk: “GEO” Academic Publ., 2013. 186 p. (In Russ.).
9. Jin W., Gong F., Zeng X., Fu R. Classification of clouds in satellite imagery using adaptive fuzzy sparse representation. *Sensors*. 2016. vol. 16. no. 12. pp. 2153.
10. Hiroshi S., Takahito I., Kouki M. High-resolution cloud analysis information derived from Himawari-8 data. *Meteorological satellite center technical note*. 2016. vol. 61. pp. 43–51.
11. Tapakis R., Charalambides A.G. Equipment and methodologies for cloud detection and classification. A review. *Solar Energy*. 2013. vol. 95. pp. 392–430.
12. Volkova E.V. [Automatic estimation of cloud cover and precipitation parameters obtained by AVHRR NOAA for day and night conditions]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovanija Zemli iz kosmosa – Modern problems of remote sensing of the Earth from space*. 2013. vol. 10. no. 3. pp. 66–74. (In Russ.).
13. Federal'naja sluzhba po gidrometeorologii i monitoringu okruzhajushhej sredy (Rosgidromet). *Kod dlja operativnoj peredachi dannyh prizemnyh meteorologicheskikh nabljudenij s seti stancij Rosgidrometa* [Code for the rapid transmission of data from surface meteorological observation network of Roshydromet stations]. Moscow: “Triada ltd.” Publ. 2013. 79 p. (In Russ.).
14. Haralick R.M., Shanmugam K., Dinstein I. Textural features for image classification. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*. 1973. vol. SMC-3. no. 6. pp. 610–621.
15. Weszka J.S., Dyer C.R., Rosenfeld A. A comparative study of texture measures for terrain classification. *IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics*. 1976. vol. SMC-6. no. 4. pp. 269–285.
16. Unser M. Sum and difference histograms for texture classification. *IEEE Transaction on Systems, Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1986. vol. PAMI-8. no. 1. pp. 118–125.
17. Kolodnikova N.V. [Review of textural features for pattern recognition problems]. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravlenija i radioelektroniki – Reports of the Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics*. 2004. vol. 9. no. 1. pp. 113–124. (In Russ.).
18. Specht D.F. Probabilistic neural networks. *Neural Networks*. 1990. vol. 3. pp. 109–118.
19. Savchenko A.V. Pattern recognition and increasing of the computational efficiency of a parallel realization of the probabilistic neural network with homogeneity testing. *Optical Memory and Neural Networks (Information Optics)*. 2013. vol. 22. no. 2. pp. 184–192.
20. Skorokhodov A.V., Aksjonov S.V., Aksjonov A.V., Lajkom D.N. [Using different computing systems to solve the automatic cloud classification problem on MODIS satellite data by probabilistic neural network]. *Izvestija Tomskogo politehnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov – Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Engineering georesources*. 2016. vol. 327. no. 1, pp. 30–38. (In Russ.).
21. Student S., Pieter J., Fujarewicz K. Multiclass classification problem of large-scale biomedical meta-data. *Procedia Technology*. 2016. vol. 11. pp. 938–945.

Д.Н. БИРЮКОВ, А.Г. ЛОМАКО, Т.Р. САБИРОВ
**АБДУКТИВНЫЙ СИНТЕЗ СТРУКТУР ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ТИПОВ
СЦЕНАРИЕВ ДЛЯ УСТАНОВЛЕНИЯ АНАЛОГИЙ В МНОГОМОДЕЛЬНОЙ
КОНЦЕПТУАЛЬНО-ОНТОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ ЗНАНИЙ**

Бирюков Д.Н., Ломако А.Г., Сабиров Т.Р. **Абдуктивный синтез структур функциональных типов сценариев для установления аналогий в многомодельной концептуально-онтологической системе знаний.**

Аннотация. В статье предложено наделить интеллектуальную систему способностью к абдуктивному порождению новых знаний, основанному на выводах по аналогии. Обладая указанной способностью, она сможет обучаться на прецедентах, имеющих место в различных проблемных областях, перенося знания о явлениях, наблюдаемых в одной проблемной области, в другую. При этом важным является тот факт, что, исходя из решаемой задачи, установление аналогий может осуществляться путем нахождения подобных структур, инвариантных свойств и близких действий, описанных в многомодельной концептуально-онтологической системе знаний. Установление семантического подобия наблюдаемых и формируемых интеллектуальной системой спецификаций базируется на возможности гиромата в общем случае осуществлять переход от аппроксимирующих концептов, принадлежащих одной проблемной области (контексту), через аппроксимируемые (более общие, абстрактные) к аппроксимирующим, но принадлежащим другой проблемной области (контексту).

Ключевые слова: интеллектуальная система, гиромат, онтология, абдукция, аналогия, семантическая близость.

1. Введение. Чтобы обеспечить возможность синтеза гироматом [1-3] сценариев упреждающего поведения в конфликте [1], может оказаться весьма полезным механизм абдуктивного порождения новых знаний, основанный на выводах по аналогии (для обнаружения потенциально возможных «Задач» и ассоциированных с ними структур «Решений») [1]. Для реализации указанного механизма интеллектуальная система (ИС) должна обладать способностью накапливать опыт, полученный в ходе наблюдения за имевшими место успешными процессами противодействия, и рекомендовать сценарии предотвращения возможных негативных последствий, устанавливая аналогичность наблюдаемых явлений и имеющих решения. Установление правдоподобных аналогий как отдельных явлений, наблюдаемых в ходе конфликта, так и фрагментов специфицированных процессов предлагается осуществлять в ходе абдуктивного синтеза, способностью к проведению которого должен обладать «Синтезатор» [1, 4, 5] интеллектуальной системы (рисунок 1). Сам же «Синтезатор» работает со знаниями, представленными в виде онтологии, построенной с учетом требований, изложенных в работе [6].

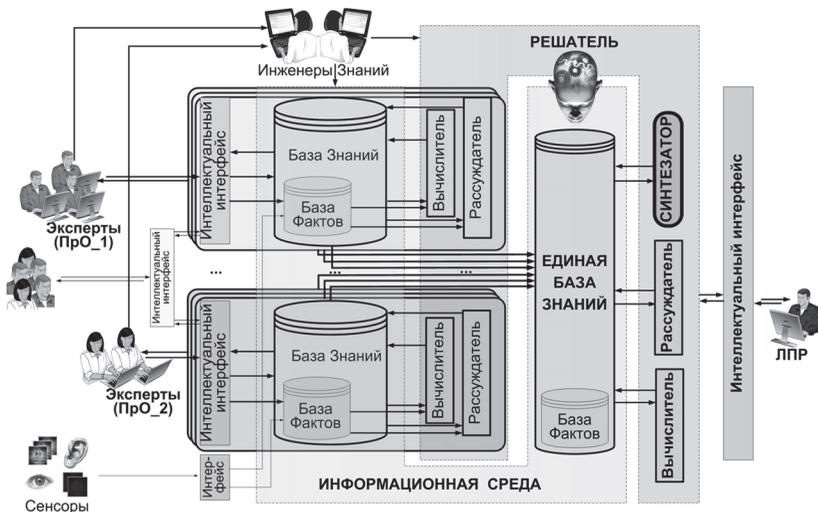


Рис. 1. Принципиальная схема ИС, участвующей в поддержке принятия решений

2. Синтез спецификаций структур процессов путем абдуктивного вывода с установлением аналогии с ранее промоделированными процессами. Предлагаемый метод абдуктивного синтеза функциональных типов сценариев в многомодельной пополняемой системе знаний состоит из одного подготовительного (нулевого) и пяти (1-5) основных этапов (рисунок 2).

Основными мероприятиями подготовительного этапа является сбор информации по результатам наблюдений и пополнение проблемного комплекса, содержащего знания из рассматриваемых предметных областей и описания решаемых ИС задач. На выходе подготовительного этапа должна быть сформирована «Задача», требующая решения. Чем полнее и точнее сформулирована «Задача», тем потенциально более точно «Решение», ассоциируемое по структуре, сможет получить гиromат [1]. Задача же в памяти гиromата в конечном итоге представляется в виде определенного фрагмента онтологии [6]. Чем больше концептов привлекается для описания «Задачи», тем большее количество разнотипных концептов будет «вспомнено» гиromатом в процессе поиска формы ее «Решений». В работах по психологии мышления отмечается, что способы решения (интеллектуальные операции) вытекают непосредственно из структуры общей задачи (абстрагируются из ее содержания).

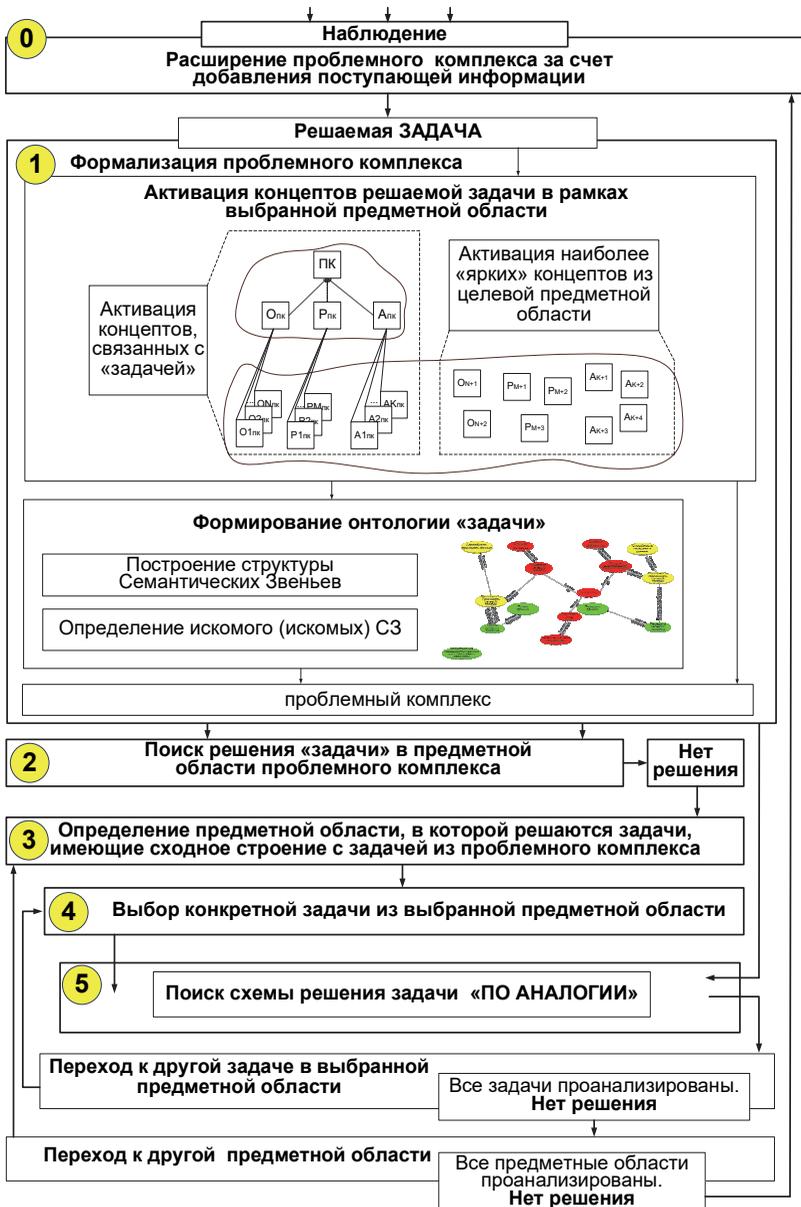


Рис. 2. Схема метода абдуктивного синтеза структур функциональных типов сценариев в многомодельной пополняемой системе знаний

В ходе выполнения основных этапов метода осуществляется поиск «Решений» выявленной «Задачи» посредством установления аналогии.

На первом этапе производится формализация проблемного комплекса. При этом в проблемный комплекс помещаются не только данные, полученные по результатам наблюдения, но и основные (наиболее доступные/«яркие») знания из той проблемной области, к которой относится «Задача». В итоге проблемный комплекс представляется в виде фрагмента онтологии, состоящего из совокупности взаимосвязанных «Семантических Звеньев» (СЗ — два концепта, связанных ролью), типы которых приведены в работе [6]. Понятие «Семантическое Звено» введено для ограничения понятия «RDF-триплет», поскольку СЗ формируются из ограниченного перечня типов концептов и типов ролей [6]. Так, все концепты, представленные в онтологии, должны быть частично упорядочены отношением аппроксимации [6] и принадлежать одному из множеств {«Объекты» — «О», «Свойства» — «Р», «Действия» — «А»}. Описание используемых для формирования СЗ ролей приведено в таблице 1.

Таблица 1. Основные типы семантических звеньев для онтологий произвольных предметных областей

Обозначение СЗ	Описание СЗ
$F1: [P \rightarrow P]$	Свойство аппроксимирует Свойство
$F1_2: [O \rightarrow O]$	Объект аппроксимирует Объект
$F1_3: [A \rightarrow A]$	Действие аппроксимирует Действие
$F2: [O \rightarrow P]$	Объект обладает Свойством
$F3: [P \rightarrow A]$	Свойство порождает способность к Действию
$F4: [A \rightarrow P]$	Действие пригодно для воздействия на Свойство
$F5: [A \rightarrow A]$	Действие следует за Действием
$F6: [O \rightarrow O]$	Объект состоит из Объекта
$F7: [A \rightarrow A]$	Действие состоит из Действия
$F8: [O \rightarrow O]$	Объект Продуцирует Объект

Далее по возможности осуществляется пополнение онтологии согласно подходу, основанному на положениях, изложенных в работах [6, 7], и заключающемся в порождении новых знаний (как новых ролей, так и новых концептов) и встраивании их в уже имеющуюся онтологию.

На втором этапе осуществляется поиск решения «Задачи» в рамках рассматриваемого проблемного комплекса. Если интеллектуальная система ранее уже встречалась с подобной «Задачей»

и находила ее «Решение», то это «Решение» находится в памяти гиромата. При его отсутствии уточняются контекстные условия существования «Задачи» и изменяется фрагмент онтологии, отражающий проблемный комплекс.

Далее выполняется обход по «Задачам» в уточненном проблемном комплексе, где потенциально могут быть правдоподобные (близкие по структуре) аналогичные «Задачи» и ассоциированные с ними «Решения».

Затем осуществляется поиск «Решения» «Задачи» на уровне аппроксимируемых объектов, то есть осуществляется поиск потенциального «Решения» в типах (пример перехода от аппроксимирующих концептов к аппроксимируемым приведен на рисунке 3).

И, наконец, осуществляется нисходящее распределение ассоциативного сигнала от аппроксимируемых концептов к аппроксимирующим концептам [6], но находящимся в проблемной области решаемой «Задачи».

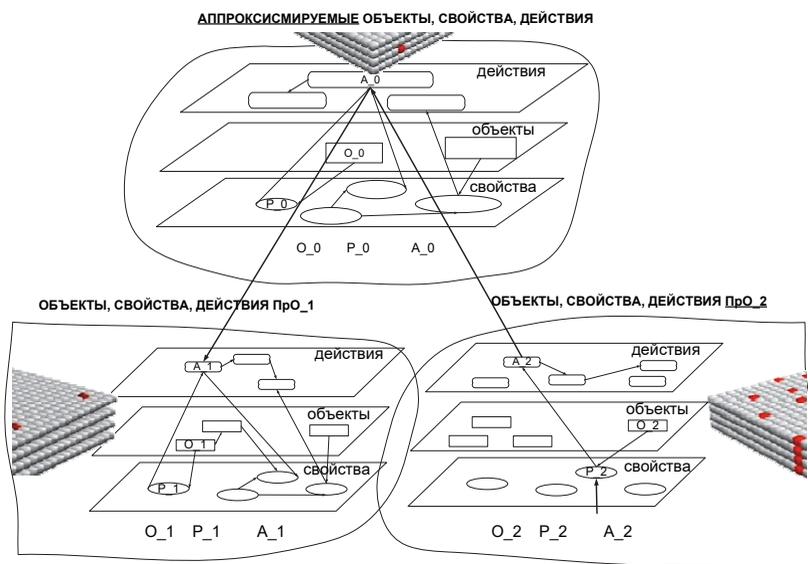


Рис. 3. Пример перехода от аппроксимирующих концептов к аппроксимируемым

Решение может отсутствовать и может быть неединственным. Если конкретное «Решение» в проблемной области «Задачи» отсутствует, то предлагается спецификация порожденного процесса в

терминах аппроксимируемых концептов, что даст возможность в дальнейшем производить уточнение полученного «Решения».

На заключительном этапе порождаются потенциальные «Решения», найденные в ходе распространения ассоциативных сигналов по ассоциативной ресурсной сети [8, 9].

Ассоциативная ресурсная сеть представляется ориентированным графом с переменной топологией [8]. Вершины соответствуют рассматриваемым сущностям, ребра — ассоциативным связям между ними. Предложенная модель хорошо согласуется с онтологической моделью представления знаний.

Каждая сущность, представленная в ассоциативной ресурсной сети, обладает яркостью. Чем больше яркость вершины, тем она «виднее» — доступнее при поиске. Ребра обладают ограниченными пропускными способностями. Чем чаще две вершины участвуют в запросе совместно, тем больше пропускная способность связывающих их ребер. Чем больше пропускная способность ребра между двумя вершинами, тем больше сила ассоциации между соответствующими сущностями (вершинами).

В работе [9] ассоциативную ресурсную сеть предложено описывать как ориентированный граф, задаваемый через множество вершин ассоциативной ресурсной сети, однозначно соотнесенных с концептами онтологии, и множество направленных ребер. Таким образом, ассоциативная ресурсная сеть функционирует в неразрывной связи с онтологией, хранящейся в базе знаний интеллектуальной системы, а каждое обращение к представленным в онтологии знаниям и их обработка приводит к изменению параметров ассоциативной ресурсной сети.

Далее найденные «Решения» должны быть проверены, поэтому они передаются на второй этап, где проверяются в рамках имеющегося проблемного комплекса в целевой проблемной области.

Содержание пятого этапа, а также его взаимодействие с этапами 1 и 4 метода приведено на рисунке 4.

Полученные в результате выводов по аналогии «Задачи» и «Решения» могут быть в последующем предварительно оценены; для этого необходимо оценить степень подобия структур обнаруженных процессов, установить инвариантности свойств взаимодействующих объектов и уточнить меру близости действий, выполняемых в рамках допустимой аналогии процессов.

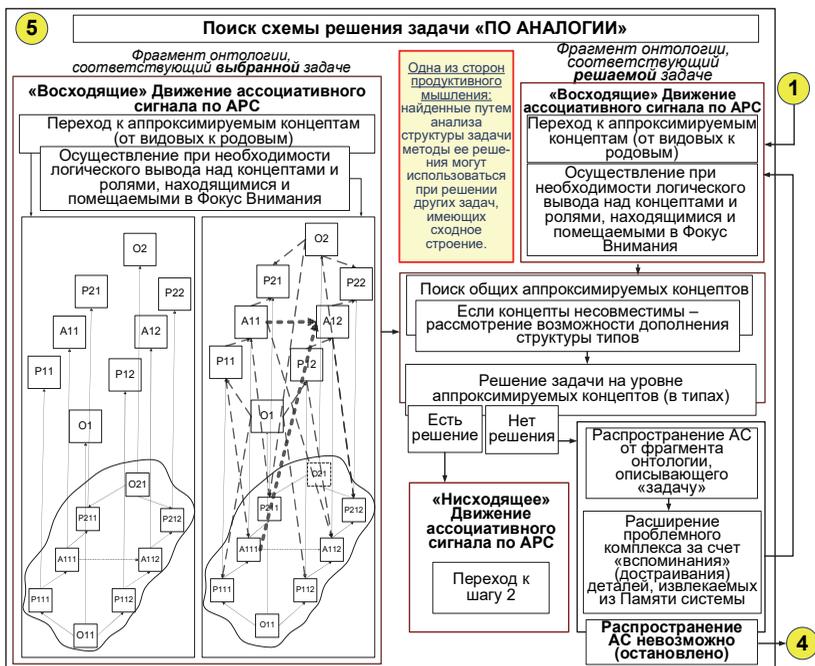


Рис. 4. Центральные этапы метода установления семантического подобия моделей «Задач» и «Решений» по аналогии

Далее механизмы абдуктивного синтеза продемонстрированы на примере, описанном в следующем разделе.

3. Пример нахождения возможного решения путем установления подобия. Пусть в базу знаний ИС занесены факты о том, что вычислительные системы бывают двух типов («Т_1» и «Т_2») и каждая из них способна воспринимать запросы («Свз»), обращенные к ней, и реагировать на них («СР»). К первому типу относится система «С1», а ко второму — «С2» (рисунок 5).

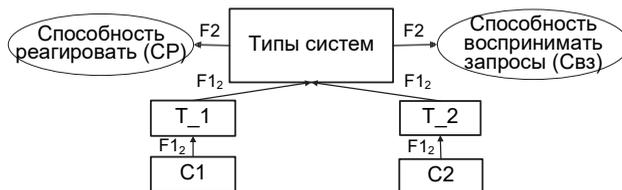


Рис. 5. Ввод данных о типах обследуемых систем

Для тестирования данных систем применяются соответствующие аудиты («А1» и «А2»). Каждый аудит состоит из двух

запросов/тестов (рисунок 6), задаваемых последовательно исследуемой системе. Для тестирования системы «С1» применяли аудит «А2», а для тестирования системы «С2» – аудит «А1» (рисунок 7). Проведение указанных аудитов признано экспертами результативным.

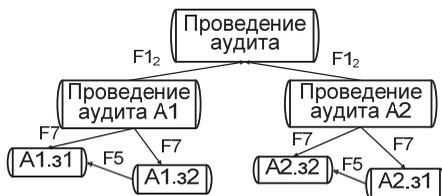


Рис. 6. Ввод данных о способах аудита

Проведение аудита, состоящего из двух тестов, означает, что сначала проводится первый тест, который переводит обследуемую систему в новое состояние, которое может отличаться от исходного. Далее уже измененная система подвергается второму тесту. Автоматически порожденные машиной логического вывода концепты в своих именах содержат историю преобразования исходного понятия (рисунок 8).

Описание проведения аудита предполагает построение интенционалов, описывающих порядок изменения тестируемой системы (рисунок 8). Так, например, сформированный концепт «СР[С1[Свз[С1],А2.з2]]» описывает способность системы «С1» реагировать после того, как ею был получен и обработан запрос «з2» из аудита «А2». Интенционал же «СР[С1[Свз[С1[Свз[С1], А2.з2]], А2.з1]]» представляет способность системы «С1» реагировать после того, как ею был получен и обработан запрос «з2», а затем «з1». Данные способности далее могут отражаться через реакции обследуемой системы «С1» и проявлять себя в значениях измерений, проводимых средствами проведения аудита или иными сторонними средствами.

Таким образом, в ходе работы машины логического вывода, реализованной в гиromате, онтология, представленная в его базе знаний, пополняется как новыми ролями, так и новыми концептами, которые на рисунках 7-10 изображены пунктирными линиями.

Допустим, далее на вход ИС подается факт о наличии системы «С3», которая относится к типу «Т1». Возникает вопрос, какой из аудитов следует провести для исследования данной системы (рисунок 9).

При этом выполняющий аудиты специалист может и не знать о проводимых ранее аудитах. Все, что ему известно — тип исследуемой системы. ИС должна порекомендовать специалисту вариант (варианты) проведения аудита. Предложенный вариант должен быть наиболее близок к тому, с чем уже встречалась ИС, то есть он должен согласовываться с имеющимся опытом, наработанным ранее.

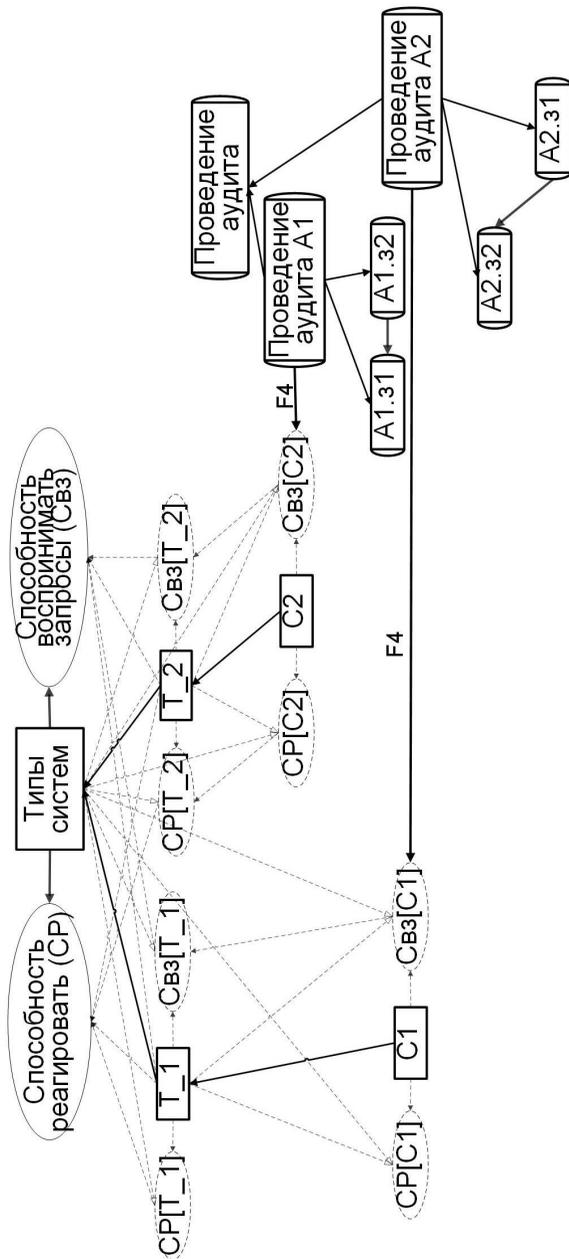


Рис. 7. Ввод данных об имевших место прецедентах

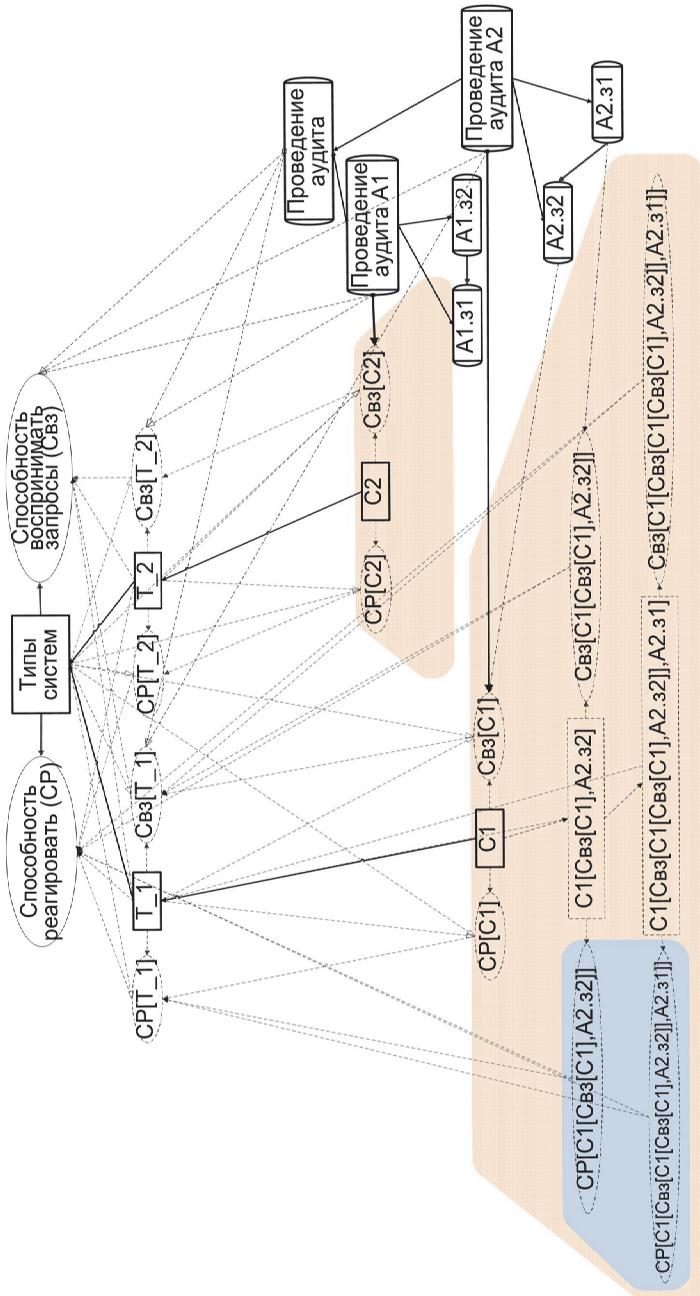


Рис. 8. Формирования интенционалов, описывающих изменение объектов (субъектов) в результате их взаимодействия

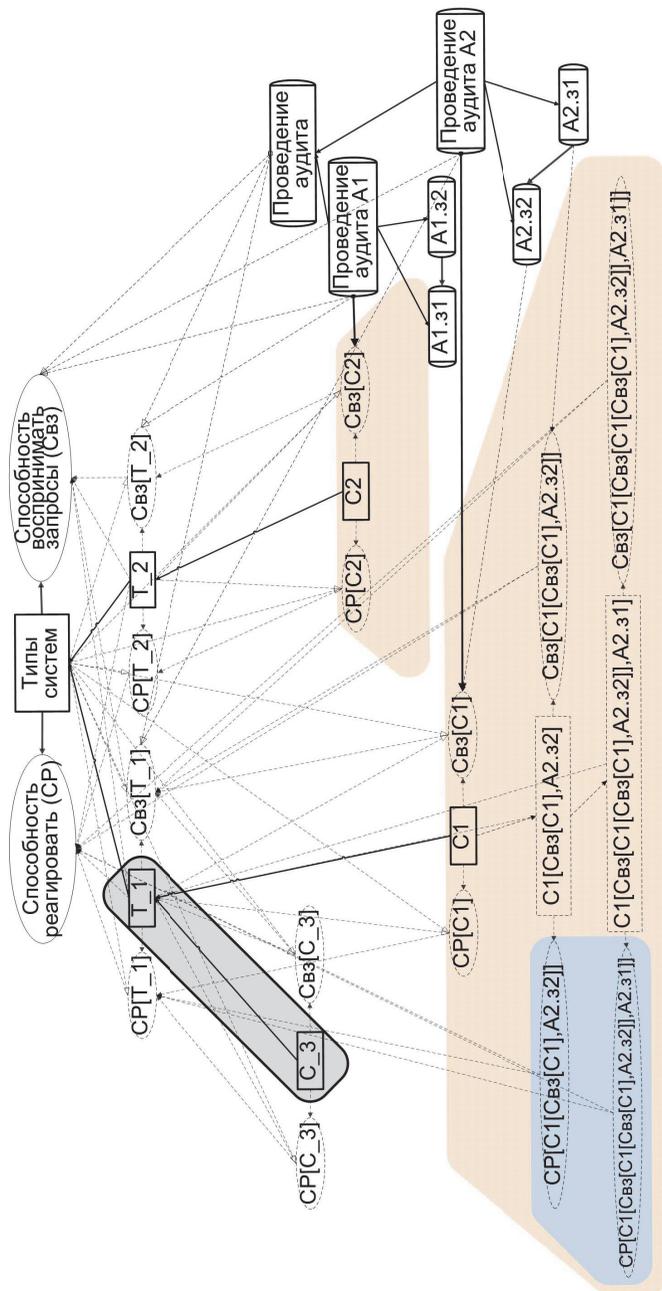


Рис. 9. Формирования проблемного комплекса, предполагающего поиск решения путем абдуктивного вывода по аналогии

Следует отметить, что в базу знаний ИС не вносились непосредственно знания о том, какой аудит нужно применять к определенному типу систем. Гиромат располагает только фактами об имевших место прецедентах. Следовательно, ответить на обозначенный вопрос ИС сможет, только осуществив вывод по аналогии.

Принципиальная возможность осуществления выводов по аналогии заложена в самой организации хранения данных. Все понятия, представленные в онтологии, частично упорядочены [7, 10, 11], а следовательно, при необходимости можно осуществить переход от видового понятия одной предметной/проблемной области (ПрО) через родовое к видовому, но принадлежащему другой ПрО. А если учесть, что концепты могут быть трех типов [6]: <Объекты>, <Свойства> и <Действия>, то можно говорить о поиске подобных структур, инвариантных свойств и близких действий.

Для вычисления степени «аналогичности» предлагается осуществлять расчет меры семантической близости.

Использование подсистемы, способной измерять значения показателей семантической близости понятий, представленных в онтологии, а соответственно, и находить семантически близкие понятия, должно позволить:

- расширять запросы, формируемые операторами к ИС и/или системе поддержки принятия решений, построенной на ее основе;
- измерять близость понятий, найденных ИС по аналогии и принадлежащих к разным системам концептуализации;
- предлагать операторам (лицам, принимающим решения) ранжированный перечень результатов, полученных по итогам обработки поступивших от них запросов.

На данный момент существует несколько типов мер близости понятий:

– меры, пригодные для определения близости между иерархически упорядоченными понятиями (близость двух понятий оценивается по положению вершин, соответствующих этим понятиям, в иерархических онтологических структурах — главным образом в таксономической иерархии);

– меры, способные учесть неиерархические отношения между понятиями (оценка близости понятий, использующая неиерархические («горизонтальные») отношения, опирается на предположение, что если два понятия имеют одно и то же отношение с третьим, то они ближе, чем два понятия, которые имеют это же отношение с различными понятиями, то есть близость двух понятий зависит от близости понятий, с которыми они имеют отношения);

– меры, учитывающие значения атрибутов (атрибутивная мера близости основана на близости значений общих атрибутов понятий);

– гибридные меры (являются сверткой вышперечисленных мер близости понятий, при этом важную роль играют значения различных весовых коэффициентов, используемых в выражениях свертки).

Также иногда используют меры близости между отношениями, которые в подавляющем большинстве основываются на вычислении средней геометрической близости понятий соответствующих аргументов сравниваемых отношений.

Достаточно полный обзор и классификация существующих мер семантической близости понятий и отношений в онтологиях приведен в работе [12].

Предложенный же в работах [6, 7] подход к представлению знаний в онтологии позволяет взглянуть на проблему вычисления меры семантической близости понятий и формируемых с помощью их спецификаций с более единых позиций, так как абсолютно все концепты в онтологии имеют свое конкретное место в соответствующем частично упорядоченном множестве (в решетке «Объектов», «Свойств» или «Действий»). В связи с этим предлагается рассмотреть применимость только тех метрик, из приведенных в работе [12], которые наиболее пригодны для оценивания семантической близости понятий, представленных в онтологии согласно правилам, описанным в работах [6, 7].

Известно, что в иерархических онтологических структурах, а главным образом в таксономической иерархии (иерархии, основанной на отношениях гипероним/гипоним, аппроксимации и т.п.), близость двух понятий может оцениваться по положению вершин, соответствующих этим понятиям.

Простейшая мера близости такого рода (S_1) основана на длине кратчайшего пути, измеряемого числом вершин (или ребер) в пути между двумя вершинами таксономии с учетом глубины таксономической иерархии [13]:

$$S_1(c_1, c_2) = \log \frac{2N}{d(c_1, c_2)},$$

где N — максимальная глубина рассматриваемых вершин (понятий): $N = \max(N(c_1), N(c_2))$; $N(c_1)$ и $N(c_2)$ глубины вершин c_1 и c_2 соответственно (максимальные глубины в таксономической иерархии); $d(c_1, c_2)$ — длина кратчайшего пути между вершинами.

Несложно проверить, что чем ниже уровень пары вершин, тем они семантически ближе по сравнению с парами более высокого уровня. Это обусловлено тем, что по мере спуска уровень семантической детализации увеличивается, а следовательно, глубина вершин тоже может учитываться [14]:

$$S_2(c_1, c_2) = \frac{2 \times N(LCS)}{N(c_1) + N(c_2)} = \frac{2 \times N(LCS)}{l(c_1, LCS) + l(c_2, LCS) + 2 \times N(LCS)},$$

где $N(LCS)$ — глубина наименьшей (наиболее глубокой) общей родительской вершины — ближайшего общего родителя (LCS); $l(c_i, LCS)$ — длина максимального пути от вершины c_i до родительской вершины LCS .

Можно предположить, что в ряде случаев при коллективном пополнении онтологии (базы знаний гиромата) могут иметь место такие ситуации, при которых, например, эксперт, вносящий информацию об «Объектах» некоторой предметной области, не в состоянии упорядочить вносимые понятия в рамках существующей таксономической иерархии, но может увязать вносимые «Объекты» с понятиями, описывающими свойства этих «Объектов». В то же время понятия, описывающие свойства «Объектов», вполне могут быть элементами какой-либо таксономической иерархии (решетки, построенной на основе отношения «Аппроксимирует»). Тогда вполне обоснованно можно утверждать, что судить о близости двух понятий, отражающих «Объекты», можно через оценивание близости понятий, с которыми они имеют отношения, а именно — через близость их «Свойств».

Следует отметить, что для перехода от одной таксономической иерархии к другой можно использовать не только отношение между «Объектами» и «Свойствами», но и другие отношения, применяемые для построения онтологий. Видится достаточно перспективным проведение отдельных исследований, связанных с определением мер близости, вычисленных с учетом меронимических отношений («Состоит из» / «Часть-целое»).

На начальном же этапе в рамках подхода к определению близости понятий, представленных в единой базе знаний ИС, предлагается особое внимание уделить тем мерам близости, которые ориентированы на учет иерархических структур, поскольку абсолютно все знания, находящиеся в памяти интеллектуальной системы, однозначно ассоциируются с вершинами онтологии, являющимися узлами таксономической иерархии [6, 15].

Возвращаясь к иллюстративному примеру, рассматриваемому выше, можно выделить фрагмент онтологии, на основании которого

гироматом может быть выдвинута гипотеза о типе проводимого аудита системы «С_3» (рисунок 10).

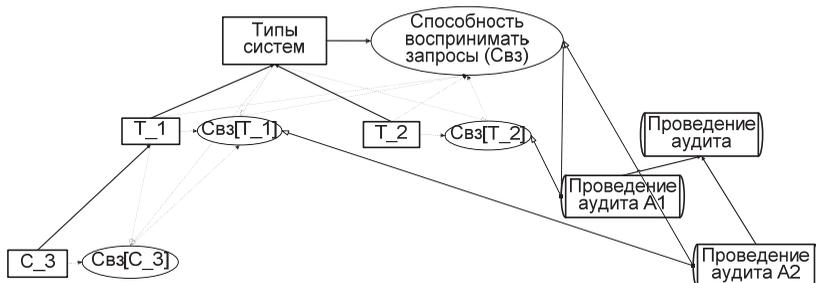


Рис. 10. Фрагмент онтологии, участвующий в формировании «Решения»

Выделим элементы семантической сети, участвующие в расчете семантической близости между понятиями «С_3» и «Проведение аудита А2», а также «С_3» и «Проведение аудита А1» (таблица 2).

Таблица 2. Структурные элементы семантической сети, участвующие в расчете меры семантической близости

№	Рассматриваемые пути в семантической сети	S_2
1	С_3 ->Свз[С_3]->Свз[Т_1]->Способность воспринимать запросы(Свз)->Т	0,57
	Проведение аудита А2->Свз[Т_1]->Способность воспринимать запросы(Свз)->Т	
2	С_3 ->Свз[С_3]->Свз[Т_1]->Способность воспринимать запросы (Свз)->Т	0,29
	Проведение аудита А1->Свз[Т_2]->Способность воспринимать запросы (Свз)->Т	

Проведенные расчеты позволяют сделать вывод о том, что исходя из накопленного интеллектуальной системой опыта для тестирования системы «С_3» рекомендуется применить аудит «А2». Следует отдельно отметить, что сформированная рекомендация основывается не только на фактах, непосредственно внесенных экспертами, но и на порожденных гироматом знаниях, представленных как в виде выведенных им ролей, так и сформированных концептов.

7. Заключение. В основе разработанного метода абдуктивного синтеза структур функциональных типов сценариев в многомерной пополяемой системе знаний лежит возможность интеллектуальной системы на основе знаний об имевших место прецедентах осуществлять вывод близких решений по аналогии.

Проведенный анализ широко применяемых в настоящее время машин логического вывода (FaCT++, HermiT, Pellet и др.) и дескрипционных логик, реализованных в них [17-21], показал, что они не способны абдуктивно порождать новые знания, осуществляя вывод по аналогии.

Установление семантического подобия наблюдаемых и формируемых ИС спецификаций базируется на возможности гиромата в общем случае осуществлять переход от аппроксимирующих концептов (а следовательно, и процессов), принадлежащих одной проблемной области (контексту), через аппроксимируемые (более общие, абстрактные) к аппроксимирующим, но принадлежащим другой проблемной области (контексту). Ввиду того, что в результате поиска по аналогии может быть порождено множество «Решений», так как в ряде случаев «спуск» по частично упорядоченному множеству концептов (от аппроксимируемых к аппроксимирующим) может приводить к помещению в фокус внимания целого ряда концептов, находящихся на одном уровне в частично упорядоченном множестве (то есть несравнимых между собой), предложено осуществлять расчет мер семантической близости понятий, участвующих в формировании искомых спецификаций, а также понятий, связанных с ними. Если же и в результате расчета и учета мер семантической близости на выходе гиромат предлагает альтернативные спецификации, то для их упорядочивания в выбранной шкале предлагается учесть параметры ассоциативной ресурсной сети, функционирующей поверх онтологии [9]. Ассоциативная ресурсная сеть позволяет учитывать опыт, накопленный интеллектуальной системой на предыдущих этапах ее функционирования, путем изменения яркости своих вершин и пропускных способностей ребер: те концепты и связи (роли) между ними, которые в большей степени подкрепляются в ходе функционирования интеллектуальной системы, в итоге становятся наиболее доступными при интеллектуальном поиске. Таким образом, в общем случае сформированная (найденная) спецификация, состоящая из понятий, с которыми связаны наиболее яркие вершины ассоциативной ресурсной сети, будет предложена в первую очередь.

Литература

1. *Бирюков Д.Н., Ломако А.Г., Ростовцев Ю.Г.* Облик антиципирующих систем предотвращения рисков реализации киберугроз // Труды СПИИРАН. 2015. № 2(39). С. 5–25.
2. *Гаазе-Рапопорт М.Г.* От амебы до робота: модели поведения // М.: Наука. 1987. 286 с.
3. *Поспелов Д.А.* Мышление и автоматы // М.: Советское радио. 1972. 224 с.
4. *Финн В.К.* Об интеллектуальном анализе данных // Новости Искусственного интеллекта. 2004. № 3. С. 3–18.
5. *Финн В.К.* Искусственный интеллект: Идеальная база и основной продукт // Труды 9-ой национальной конференции по искусственному интеллекту. М.: Физматлит. 2004. Т. 1. С. 11–20.
6. *Бирюков Д.Н., Ломако А.Г.* Денотационная семантика контекстов знаний при онтологическом моделировании предметных областей конфликта // Труды СПИИРАН. 2015. №5(42). С. 155–179.
7. *Бирюков Д.Н., Ломако А.Г., Жолус Р.Б.* Пополнение онтологических систем знаний на основе моделирования умозаключений с учетом семантики ролей // Труды СПИИРАН. 2016. № 4(47). С. 105–129.

8. *Жулякова Л.Ю.* Модель ассоциативной памяти, основанная на динамической ресурсной сети // Материалы конференции «Управление в технических, эргатических, организационных и сетевых системах (УТЭОСС-2012)». СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электрон»». 2012. С. 1160–1163.
9. *Бирюков Д.Н., Глухов А.П., Сабиров Т.Р., Пилькевич С.В.* Модель изменения доступности знаний, представленных в памяти киберсистемы, обеспечивающей нейтрализацию деструктивных воздействий на объекты критической информационной инфраструктуры // Научные исследования в космических исследованиях Земли. 2016. Часть 8. № 4. С. 56–63.
10. *Scott D.S.* Models for various type-free calculi // *Studies in Logic and the Foundations of Mathematics*. 1973. vol. 74. pp. 157–187.
11. *Scott D.S.* Lattice theory, data types and semantics // *Formal semantics of programming languages*. 1972. vol. 2. pp. 65–106.
12. *Крюков К.В. и др.* Меры семантической близости в онтологии // Пробл. управл. 2010. № 5. С. 2–14.
13. *Leacock C., Chodorow M.* Combining local context and WordNet similarity for word sense identification // *WordNet: An electronic lexical database*. 1998. vol. 49. no. 2. pp. 265–283.
14. *Wu Z, Palmer M.* Verb semantics and lexical selection // 32nd Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics. 1994. pp. 133–138.
15. *Resnik P.* Semantic similarity in a taxonomy: An information based measure and its application to problems of ambiguity in natural language // *Journal of Artificial Intelligence Research*. 1999. vol. 11. pp. 95–130.
16. *Calvanese D., Giacomo G., Lenzerini M., Rosati R.* View-based query answering in description logics: Semantics and complexity // *J. of Computer and System Sciences*. 2012. № 78(1). pp. 26–46.
17. *Eiter T., Ortiz M., Simkus M.* Conjunctive query answering in the description logic SH using knots // *J. of Computer and System Sciences*. 2012. № 78(1). pp. 47–85.
18. *Kikot S., Tsarkov D., Zakharyashev M., Zolin E.* Query Answering via Modal Definability with FaCT++: First Blood // *Description Logics*. 2013. pp. 328–340.
19. *Zhang X. et al.* A distance-based paraconsistent semantics for DL-Lite // *International Conference on Knowledge Science, Engineering and Management*. 2015. pp. 15–27.
20. *Goncalves R., Matenzoglu N., Parsia B., Sattler U.* The empirical robustness of description logic classification // *Proceedings of the 2013th International Conference on Posters & Demonstrations Track-Volume 1035. CEUR-WS. Org*. 2013. pp. 277–280.
21. *Glimm B. et al.* Hermit: An owl 2 reasoner // *Autom. Reason*. 2014. vol. 53(3). pp. 245–269.

Бирюков Денис Николаевич — д-р техн. наук, профессор кафедры систем сбора и обработки информации, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского (ВКА им. А.Ф. Можайского). Область научных интересов: системный анализ, защита информации, интеллектуальная поддержка принятия решений. Число научных публикаций — 85. Viryukov.D.N@yandex.ru; ул. Ждановская, 13, Санкт-Петербург, 197198; р.т.: +7(812) 237-19-60.

Ломако Александр Григорьевич — д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры систем сбора и обработки информации, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского (ВКА им. А.Ф. Можайского). Область научных интересов: информационная безопасность, теоретическое и системное программирование, синтез и верификация корректности моделей программ, системы искусственного интеллекта. Число научных публикаций — 290. lomako_ag@mail.ru; ул. Ждановская, 13, Санкт-Петербург, 197198; р.т.: +7(812) 237-19-60.

Сабиров Тимур Римович — адъюнкт кафедры систем сбора и обработки информации, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского (ВКА им. А.Ф. Можайского). Область научных интересов: интеллектуальная поддержка принятия решений. Число научных публикаций — 15. Rowing-team@mail.ru; ул. Ждановская, 13, Санкт-Петербург, 197198; р.т.: +7(812) 237-19-60.

D.N. BIRYUKOV, A.G LOMAKO, T.R. SABIROV
**ABDUCTIVE SYNTHESIS OF THE STRUCTURES OF THE
 FUNCTIONAL TYPES OF SCENARIOS TO ESTABLISH THE
 MULTI-MODEL ANALOGIES IN CONCEPTUAL AND
 ONTOLOGICAL KNOWLEDGE**

Biryukov D.N., Lomako A.G, Sabirov T.R. Abductive Synthesis of the Structures of the Functional Types of Scenarios to Establish the Multi-Model Analogies in Conceptual and Ontological Knowledge.

Abstract. It is proposed to empower the intelligent system with an ability of the abductive generation of new knowledge based on conclusions by analogy. With such an ability it could be trained on precedents, taking place in different areas, transferring knowledge about the phenomena observed in one subject area to another. It is important that, on the basis of the task to be solved, the establishment of analogies can be carried out by means of finding similar structures, invariant properties and akin actions in the multi-model conceptual and ontological knowledge system. Establishing semantic similarity of the observed specifications and the ones generated by an intelligent system is based on the ability of the Giromat in general case to perform the transition from the approximating concepts that belong to the same problem domain (context), through the approximated ones (more general, abstract), to approximating as well, but belonging to a different problem domain (context).

Keywords: intelligent system, giromat, ontology, abduction, analogy, semantic closeness.

Biryukov Denis Nikolaevich — Ph.D., Dr. Sci., professor of systems for collecting and processing information department, Mozhaisky Military Space Academy. Research interests: system analyses, IT-Security, intelligent decision support. The number of publications — 85. Biryukov.D.N@yandex.ru; 13, Zhdanovskaya street, St.-Petersburg, 197198, Russia; office phone: +7(812) 237-19-60.

Lomako Aleksandr Grigor'evich — Ph.D., Dr. Sci., professor, professor of system for collecting and processing information department, Mozhaisky Military Space Academy. Research interests: information security, theoretical and system programming, synthesis and verification of program models, artificial intelligence systems. The number of publications — 290. lomako_ag@mail.ru; 13, Zhdanovskaya street, St.-Petersburg, 197198, Russia; office phone: +7(812) 237-19-60.

Sabirov Timur Rimovich — Ph.D. student of system for collecting and processing information department, Mozhaisky Military Space Academy. Research interests: intelligent decision support. The number of publications — 15. Rowing-team@mail.ru; 13, Zhdanovskaya street, St.-Petersburg, 197198, Russia; office phone: +7(812) 237-19-60.

References

1. Biryukov D.N., Lomako A.G., Rostovtsev Y.G. [The Appearance Cyber Threats Risk Prevention Systems]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*. 2015. vol. 2(39). pp. 5–25. (In Russ).
2. Gaaze-Rapoport M.G. *Ot ameby do robota: modeli povedeniya* [From the amoeba to the robot: model behavior]. M.: Nauka. 1987. 286 p. (In Russ).
3. Pospelov D.A. *Myshlenie i avtomaty* [Thinking and machines]. M.: Sovetskoe radio. 1972. 224 p. (In Russ).

4. Finn V.K. [About data mining]. *Novosti isskustvennogo intellekta – Artificial intelligence news*. 2004. vol. 3. pp. 3–18. (In Russ).
5. Finn V.K. [Artificial intelligence: a Conceptual framework and the main product]. *Trudy 9-oj nacional'noj konferencii po iskusstvennomu intellektu* [Proceedings of the 9th national conference on artificial intelligence]. M.: Fizmatlit. 2004. Issue 1. pp. 11–20. (In Russ).
6. Biryukov D.N., Lomako A.G. [Denotational semantics of knowledge contexts in ontologic modeling of subject domains of the conflict]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*. 2015. vol. 5(42). pp. 155–179. (In Russ).
7. Birjukov D.N., Lomako A.G., Zholus R.B. [Ontological knowledge system completion based on modeling inferences considering role semantic]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*. 2016. vol. 4(47). pp. 105–129. (In Russ).
8. Zhilyakova L.Yu. [The model of associative memory based on a dynamic resource network]. *Materialy konferencii "Upravlenie v tekhnicheskikh, ehrgaticheskikh, organizacionnyh i setevykh sistemah (UTEHOSS-2012)"* [Materials of the conference "Management in technical, ergatic, organizational and network systems (TEONS)"]. St. Petersburg: SSC RF JSC "Concern "CRI "Electropribor". 2012. pp. 1160–1163. (In Russ).
9. Birjukov D.N., Gluhov A.P., Sabirov T.R., Pil'kevich S.V. [Model of change accessible knowledge, in-memory representation cybersystems to neutralize the destructive effects on critical information infrastructure objects]. *Naukoemkie tehnologii v kosmicheskikh issledovaniyah Zemli – H&ES Research*. 2016. vol.8. no. 4 pp. 56–63. (In Russ).
10. Scott D.S. Models for various type-free calculi. *Studies in Logic and the Foundations of Mathematics*. 1973. vol. 74. pp. 157–187.
11. Scott D.S. Lattice Theory, Data Types and Semantics. *Formal semantics of programming languages*. 1972. vol. 2. pp. 65–106.
12. Kryukov K.V. et al. [Measures of semantic similarity in ontology]. *Problemy upravleniya – Management problems*. 2010. vol. 5. pp. 2–14. (In Russ).
13. Leacock C., Chodorow M. Combining local context and WordNet similarity for word sense identification. *WordNet: An electronic lexical database*. 1998. vol. 49. no. 2. pp. 265–283.
14. Wu Z, Palmer M. Verb semantics and lexical selection. *32nd Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics*. 1994. pp. 133–138.
15. Resnik P. Semantic similarity in a taxonomy: An information based measure and its application to problems of ambiguity in natural language *Journal of Artificial Intelligence Research*. 1999. vol. 11. pp. 95–130.
16. Calvanese D., Giacomo G., Lenzerini M., Rosati R. View-based query answering in description logics: Semantics and complexity *J. of Computer and System Sciences*. 2012. vol. 8(1). pp. 26–46.
17. Eiter T., Ortiz M., Simkus M. Conjunctive query answering in the description logic SH using knots. *J. of Computer and System Sciences*. 2012. vol. 78(1). pp. 47–85.
18. Kikot S., Tsarkov D., Zakharyashev M., Zolin E. Query Answering via Modal Definability with FaCT++: First Blood. *Description Logics*. 2013. pp. 328–340.
19. Zhang X. et al. A distance-based paraconsistent semantics for DL-Lite. *International Conference on Knowledge Science, Engineering and Management*. 2015. pp. 15–27.
20. Goncalves R., Matentzoglou N, Parsia B., Sattler U. The empirical robustness of description logic classification. *Proceedings of the 2013th International Conference on Posters & Demonstrations Track-Volume 1035. CEUR-WS. Org*. 2013. pp. 277–280.
21. Glimm B., Horrocks I., Motik B., Stoilos G., Wang Z. Hermit: An owl 2 reasoner. *Autom. Reason*. 2014. vol. 53(3). pp. 245–269.

А.В. ПАРШУТКИН, П.А. МАСЛАКОВ
**ИССЛЕДОВАНИЕ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ
СОВРЕМЕННЫХ СТАНДАРТОВ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ К
ВОЗДЕЙСТВИЮ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПОМЕХ**

Паршуткин А.В., Маслаков П.А. Исследование помехоустойчивости современных стандартов спутниковой связи к воздействию нестационарных помех.

Аннотация. В статье рассматривается модель воздействия нестационарных помех на каналы спутниковой связи стандартов DVB-S2 и DVB-RCS, а также на каналы с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты. Проведено сравнение результатов воздействия непреднамеренных нестационарных помех на каналы спутниковой связи, возникающих от стационарных и нестационарных источников помех с одинаковой средней мощностью. В качестве показателя помехоустойчивости каналов спутниковой связи используется вероятность битовой ошибки. В статье введен показатель — коэффициент времени существования нестационарной помехи, который характеризует величину концентрации энергии при фиксированной средней мощности помехи в некоторой ограниченной временной области полезного сигнала. Показано, что при определенных значениях коэффициента времени существования нестационарных помех для низкого отношения помеха/сигнал они могут оказывать более опасное воздействие на каналы связи, чем непрерывная шумовая помеха, повышая вероятность битовой ошибки.

Ключевые слова: DVB-S2, DVB-RCS, псевдослучайная перестройка рабочей частоты, нестационарная помеха, помехоустойчивость, коэффициент времени существования помехи.

1. Введение. Современный этап развития телекоммуникационных систем в России характеризуется активным повсеместным применением технологий спутниковой связи. Данный факт обусловлен не только новыми возможностями и услугами связи, но и ограниченным развитием на значительной части территории страны инфраструктуры наземных телекоммуникационных систем. В этих условиях важнейшими задачами поставщика услуг связи становится оптимальное использование спектрального ресурса спутникового канала при заданных соотношениях «скорость передачи – помехоустойчивость», а также необходимость обеспечения требуемого уровня качества обслуживания абонентов сети в любых условиях погодной и помеховой обстановки [1-4]. Эффективное использование ресурса ретранслятора с возможностью передачи разнородного трафика дает возможность применять единую сетевую инфраструктуру и общие стандарты в процедуре сигналообразования, а также уменьшить разнообразие типов оборудования. В настоящее время технологией, позволяющей организовывать такие мультисервисные сети, стал режим многочастотного множественного доступа с разделением во времени и основанный на данном режиме стандарт спутниковой связи DVB-RCS (Digital Video Broadcasting – Return Channel via Satellite) [5]. Еще одним компромиссным

вариантом обеспечения высокой помехозащищенности каналов спутниковой связи при максимальном использовании частотного ресурса ретранслятора, является режим псевдослучайной перестройки рабочей частоты (ППРЧ), что позволяет сохранять высокие скорости передачи данных с возможностью поддержания многостанционного доступа абонентов в пакетных радиосетях [6].

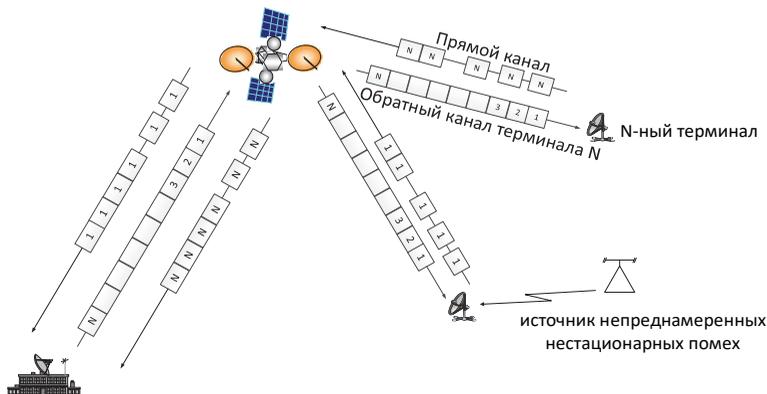
В то же время большинство исследований в этой области проведены с использованием модели канала с аддитивным «белым» гауссовским шумом. Такая модель не применима в случае воздействия нестационарных помех (НП) с изменяющейся во времени мощностью, которые могут возникать, например, при расположении земной спутниковой станции вблизи радиолокационной станции кругового обзора или при расположении источников помех на движущемся транспорте [7-9].

На станции спутниковой связи могут воздействовать как непрерывные стационарные, так и нестационарные, в том числе импульсные, помехи той же средней мощности. При этом, несмотря на отличия в эффекте воздействия таких помех на приемное устройство, на окне индикации анализатора спектра, имеющего достаточно большие интервалы осреднения накапливаемых сигналов, отобразится одинаковый уровень средней мощности помехи. Данное обстоятельство затрудняет оценивание степени влияния непреднамеренных помех на функционирование земных станций спутниковой связи и должно быть учтено в ходе решения задачи обеспечения их электромагнитной совместимости, а также в процессе проектирования и поддержания условий их устойчивого функционирования.

Целью статьи является сравнительный анализ помехоустойчивости отдельных каналов спутниковой связи, использующих различные сочетания сигнально-кодовых конструкций при воздействии на них НП. В качестве ограничений исследования в статье принято следующее: тип трафика сети — видеоданные, каналы спутниковой связи — на основе стандартов DVB-RCS, DVB-S2 и с ППРЧ.

2. Модели каналов спутниковой связи стандартов DVB-RCS и DVB-S2 в условиях воздействия нестационарных помех. Стандарт DVB-RCS предлагает прямой канал, основанный на формате данных DVB/MPEG-2, и обратный канал на основе режима MF-TDMA (Multi-Frequency Time-Division Multiple Access — многочастотного множественного доступа с разделением по времени). Использование еще одного стандарта DVB-S2 для прямого канала оправдывается экономическими соображениями ввиду наличия большого количества уже готовых терминалов данного стандарта [10]. Таким образом, необходимо проводить исследование помехоустойчивости каналов спутниковой связи, использующих оба стандарта.

При организации сети связи с технологией MF-TDMA по топологии «звезда» центральная станция является необходимым элементом на протяжении всего сеанса связи (рисунок 1). Она осуществляет организацию вхождения в связь, поддерживает соединение в течение всего сеанса связи и осуществляет передачу данных в прямом канале на земную станцию в течение всего сеанса связи, осуществляет разрыв соединения по запросу одного из пользователей.



Центральная земная станция

Рис. 1. Схема воздействия источника непреднамеренных нестационарных помех на станцию спутниковой связи, использующую технологию MF-TDMA

Состояние частотно-временного ресурса может быть описано таблицей частотно-временного плана, представляющей собой формализованную запись закрепления части общего частотно-временного ресурса на заданном интервале за конкретными терминалами. Такая таблица может быть записана матрицей следующего вида [11]:

$$E_{[L,K]} = \begin{bmatrix} e_{1,1} & \dots & e_{1,K} \\ \dots & \dots & \dots \\ e_{L,1} & \dots & e_{L,K} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где — условный положительный номер терминала сети связи, занимающего k -й по времени и l -й по частоте частотно-временной интервал (ЧВИ), $l=1 \dots L$, $k=1 \dots K$. При этом $e_{l,k} = 0$, если ЧВИ не используется для передачи.

Одним из вариантов представления частотно-временной структуры сигнала по стандарту DVB-RCS является частотно-временная матрица, представляющая собой совокупность частотно-временных

посылок (ЧВП) $\gamma_{L,K}$. При этом каждая ЧВП образована из временных интервалов работы отдельных терминалов связи длительностью $\Delta T^{\text{ЧВИ}}$ и частотных интервалов шириной $\Delta f^{\text{ЧВИ}}$:

$$\Gamma_{[L,K]} = \begin{bmatrix} \gamma_{1,1} & \dots & \gamma_{1,K} \\ \dots & \dots & \dots \\ \gamma_{L,1} & \dots & \gamma_{L,K} \end{bmatrix}, \text{ где } \gamma_{l,k} = \begin{cases} 0 & | e_{l,k} = 0, \\ 1 & | e_{l,k} > 0. \end{cases} \quad (2)$$

Схема образования кадра являет собой частотно-временную матрицу MF-TDMA $\Gamma_{[L,K]}$. В качестве примера рассмотрим передачу данных в виде отдельных информационных блоков от четырех различных пользователей с разным уровнем приоритета (рисунок 2). При этом принимается, что $\Delta T^{(\text{кад})}$ — максимальный интервал времени, через который осуществляется последовательная передача ЧВП от одного терминала, $\Delta f^{(\text{кад})}$ — полоса из частотных интервалов $\Delta f^{\text{ЧВИ}}$.

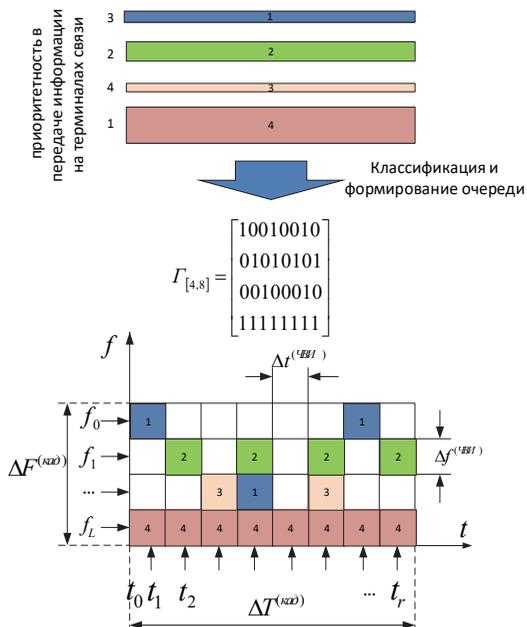


Рис. 2. Схема образования кадра MF-TDMA для пользователей с разным уровнем приоритета

Следует подчеркнуть, что для передачи видеоданных в режиме реального времени необходимы информационные скорости не менее 350 кБит/с и постоянная поддержка соединения [12]. Данное требование может быть выполнено за счет закрепления на канале MF-TDMA определенного количества ЧВИ за терминалом связи, которому необходимо осуществлять передачу такого типа данных (в рассматриваемом случае для четвертого пользователя). Стандарт DVB-RCS предусматривает возможность выбора типа пакетов трафика в обратном канале, поскольку IP-пакеты могут передаваться как в ячейках ATM, так и в MPEG2 пакетах, однако для передачи видеоданных последние предпочтительнее ввиду большей спектральной эффективности.

Принципы функционирования и математические выражения для описания всего радиоканала стандарта DVB-RCS детально описаны в технической документации [5]. Однако для решения поставленных задач следует построить модель не всех блоков, а только тех из них, которые определяют помехоустойчивость системы связи: блоков модуляции и помехоустойчивого кодирования.

Особенностью помехоустойчивого кодирования стандарта DVB-RCS является каскадное применение кодов Рида-Соломона и Витерби, что не только повышает корректирующую способность кода, но и обеспечивает более высокую эффективность использования полосы частот спутникового канала при заданных требованиях к вероятности битовой ошибки. А используемые в современных терминалах турбокоды еще больше повышают эти характеристики, обеспечивая снижение требований к отношению сигнал/шум более чем на 1 дБ [13]. Кроме того, стандарт предусматривает режим адаптивного кодирования и модуляции, при котором параметры кода и вид модуляции могут меняться от кадра к кадру.

Для построения блочных турбокодов применяются различные блочные коды, такие как Хемминга, Рида — Соломона, Боуза — Чоудхури — Хоквингема (БЧХ). Однако в спутниковых линиях связи в настоящее время применяются в основном блочные турбокоды, построенные на базе кодов Хемминга. Этот факт объясняется, в первую очередь, сложностью декодирования кодов Рида — Соломона, кодов БЧХ, и как следствие, увеличением времени, затраченного на одну итерацию.

Принцип построения блочных турбокодов на базе кодов Хемминга заключается в следующем: поток передаваемой информации разделяется на блоки по N бит, каждый блок записывается в матрицу размером $m \times n$, где m — количество строк, а n — количество столбцов матрицы [14]. Производится кодирование по строкам и столбцам матрицы кодом Хемминга.

Результат кодирования — матрица размерностью $m=i+p$ строк и $n=i+p$ столбцов (рисунок 3), где i — информационные биты, p — проверочные биты.

i	i	i	i	p	p	p
i	i	i	i	p	p	p
i	i	i	i	p	p	p
i	i	i	i	p	p	p
p	p	p	p	p	p	p
p	p	p	p	p	p	p
p	p	p	p	p	p	p

Рис. 3. Принцип построения блочного турбокода $[7,4] \times [7,4]$ на базе кода Хемминга $[7,4]$

Таким образом, период кодового слова блочного турбокода:

$$T = SK + [i + p] \times [i + p], \quad (3)$$

где SK — длина синхрослова (синхрокомбинации), которая добавляется вначале кодированного блока.

Из матрицы, полученной в результате кодирования, биты считываются построчно, начиная с первого информационного.

Кодовое слово образует кадровую структуру потока. Кадровая структура для блочного турбокода $[7,4] \times [7,4]$ при добавлении к нему синхрокомбинации представлена на рисунке 4, где i — информационные биты, p — проверочные биты, SK — синхрослово (синхрокомбинация).

SK	iiii	ppp	iiii	ppp	iiii	ppp	iiii	ppp	pppp	ppp	pppp	ppp	pppp	ppp
SK	iiii	ppp	iiii	ppp	iiii	ppp	iiii	ppp	pppp	ppp	pppp	ppp	pppp	ppp
SK	iiii	ppp	iiii	ppp	iiii	ppp	iiii	ppp	pppp	ppp	pppp	ppp	pppp	ppp
.
.
.
SK	iiii	ppp	iiii	ppp	iiii	ppp	iiii	ppp	pppp	ppp	pppp	ppp	pppp	ppp

Рис. 4. Кадровая структура блочного турбокода на базе кода Хемминга $[7,4]$

Рассмотрим модель нестационарной помехи $\xi_{\text{НП}}$, которую можно представить в виде последовательности импульсов шума (рисунок 5), определяемых двумя основными параметрами — их длительностью $\tau_{\text{имп}}$ и паузами Δt между ними:

$$\xi_{\text{НП}}(t) = \begin{cases} \frac{1}{\rho} \chi(t), & j(\tau_{\text{имп}} + \Delta t) \leq t \leq [(j+1)\tau_{\text{имп}} + j\Delta t], \\ 0, & \text{при } [(j+1)\tau_{\text{имп}} + j\Delta t] \leq t \leq [(j+1)\tau_{\text{имп}} + j\Delta t]. \end{cases} \quad (4)$$

где $j=0 \dots J$; $\chi(t)$ — шумовой случайный процесс с нулевым математическим ожиданием и среднеквадратичным отклонением σ ; ρ — коэф-

коэффициент времени существования помехи, определяемый в соответствии с выражением:

$$\rho = \frac{\tau_{\text{шмн}}}{\tau_{\text{шмн}} + \Delta t}. \quad (5)$$

Для случая $\rho=1$ нестационарная помеха становится стационарной.

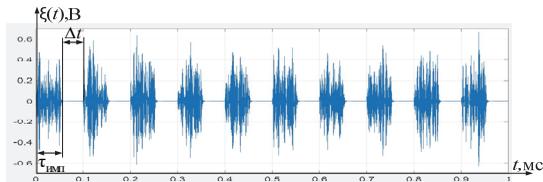


Рис. 5. Пример периодической нестационарной помехи

Отличия в воздействии шумовых непрерывных и нестационарных помех на канал связи показаны на временных диаграммах исходной и детектированных информационных последовательностей (рисунок 6). Для нормированного отношения сигнал/помеха (отношения энергии бита E_b к спектральной плотности мощности шума Z) 13 дБ и вида модуляции BPSK при значении $\rho=0.66$ в случае воздействия шумовой непрерывной помехи (ШНП) искаженным оказался 21 символ, а НП — 17.

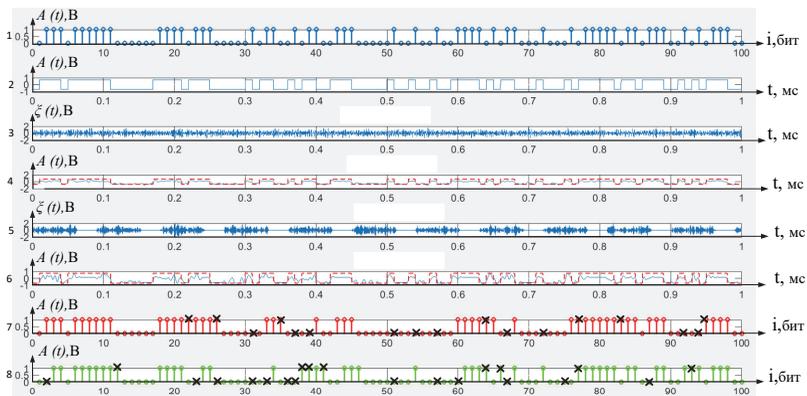


Рис. 6. Временные диаграммы исходной и детектированных информационных последовательностей при воздействии ШНП и НП: 1) Значения передаваемых информационных бит; 2) импульсный центрированный информационный сигнал; 3) шумовая непрерывная помеха; 4) импульсный центрированный информационный сигнал при воздействии ШНП; 5) НП; 6) импульсный центрированный информационный сигнал при воздействии НП; 7) значения принятых информационных бит при ШНП; 8) значения принятых информационных бит при НП

При этом спектральная плотность мощности нестационарной помехи определяется в соответствии с выражением:

$$Z = \frac{P_{\text{ср}}}{\rho \Delta f}, \quad (6)$$

где $P_{\text{ср}}$ — средняя мощность источника помех, Δf — полоса занимаемая помехой.

На основании математической модели в программной среде Matlab была построена имитационная модель функционирования канала спутниковой связи DVB-RCS с возможностью перехода в стандарт DVB-S2 в условиях воздействия НП, структурная схема которой показана на рисунке 7. Модель включает в себя следующие элементы:

- модель наземной передающей станции;
- модель наземной приемной станции;
- модель спутникового ретранслятора;
- модели источников нестационарных непрерывных шумовых помех, а также «белого» гауссовского шума.

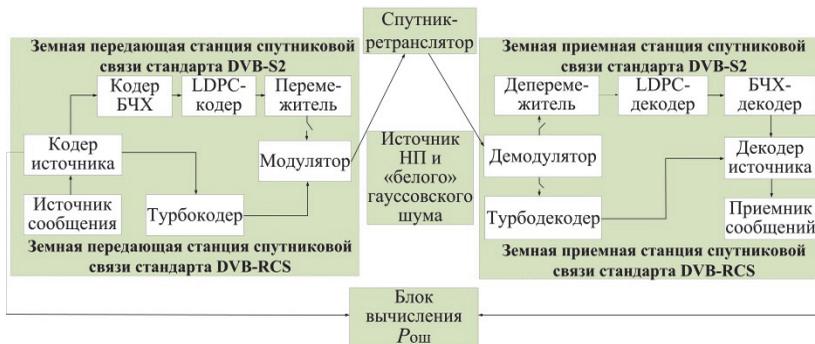


Рис. 7. Схема функционирования канала спутниковой связи DVB-RCS в условиях воздействия шумовых непрерывных или нестационарных с возможностью переключения в режим DVB-S2

Исходными данными при моделировании канала связи стандарта DVB-RCS приняты виды модуляции QPSK и 8PSK и помехоустойчивый турбокод со скоростью помехоустойчивого кодирования $2/3$. При этом предполагается, что синхронизация обеспечена, скорость передачи данных составляет 2048 кбит/с, шифрования трафика не производится, а в качестве пакетной структуры используется кадр MPEG, размером 188 байт.

Информационное сообщение, проходя через канал сигналообразования, преобразуется в полезный сигнал $S(t)$. С учетом воздействия

«белого» гауссовского шума $n(t)$ и помех $\xi_{\text{шп}}(t)$ на вход приемника поступает аддитивная смесь:

$$U(t) = S(t) + \xi_{\text{шп}}(t) + n(t). \quad (7)$$

Одним из основных показателей помехоустойчивости цифровых систем спутниковой связи является вероятность битовой ошибки $P_{\text{ош}}$, которая рассчитывается как отношение между средним количеством неправильно принятых информационных бит и их общим количеством по результатам проведения 100 экспериментов при передаче информационного сообщения размером 10 млн. бит, разбитом на блоки данных в соответствии со стандартами. При этом коэффициент ρ , максимизирующий вероятность битовой ошибки, определяется методом перебора всех возможных значений $\tau_{\text{шп}}$ и Δt . Так, в качестве примера на рисунке 8 показаны значения ρ , полученные в ходе имитационного моделирования воздействия НП на сигнально-кодировую конструкцию DVB-RCS с видом модуляции 8PSK и скоростью помехоустойчивого кодирования 2/3. На полученном графике виден перегиб, в котором достигается максимальное значение $P_{\text{ош}}$ в точке, где $\rho=0.2$ (при отношении сигнал/помеха 3 дБ).

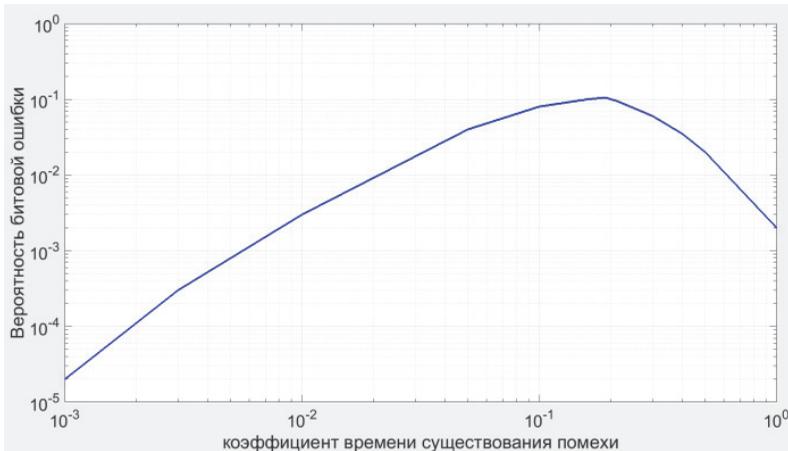


Рис. 8. Поиск значения ρ , максимизирующего $P_{\text{ош}}$ для случая сигнально-кодировой конструкции DVB-RCS с модуляцией 8PSK

На рисунке 9 представлен график зависимости $P_{\text{ош}}$ от отношения сигнал/помеха для стандарта DVB-RCS.

Анализ данных зависимостей позволяет сделать вывод о большей опасности НП по сравнению с ШНП для модуляции более высокого порядка.

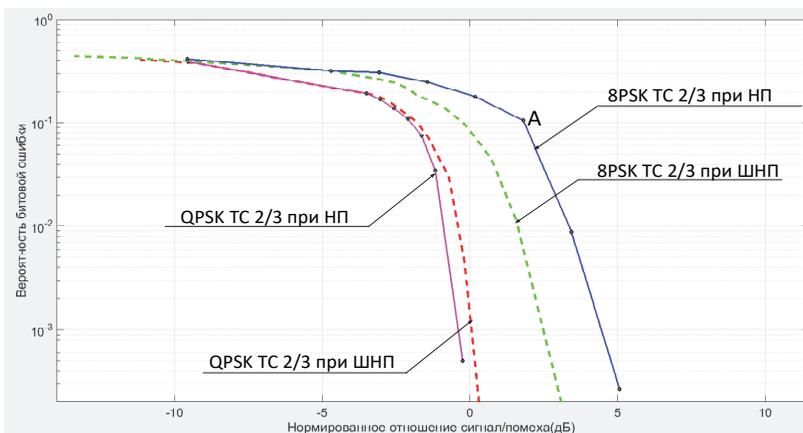


Рис. 9. График $P_{\text{ош}}$ стандарта DVB-RCS со скоростью помехоустойчивого кодирования TC 2/3 и видами модуляции QPSK и 8-PSK к воздействию шумовых непрерывных и нестационарных помех

Аналогичные исследования проведены для стандарта DVB-S2 (рисунок 10) [7, 15-17]. При этом в качестве исходных данных принято следующее: кадр нормальный (длиной 64800 бит), виды модуляции QPSK и 8PSK, скорости кодирования (1/4, 1/3, 2/5, 3/5, 2/3, 3/4, 4/5, 5/6, 8/9 и 9/10).

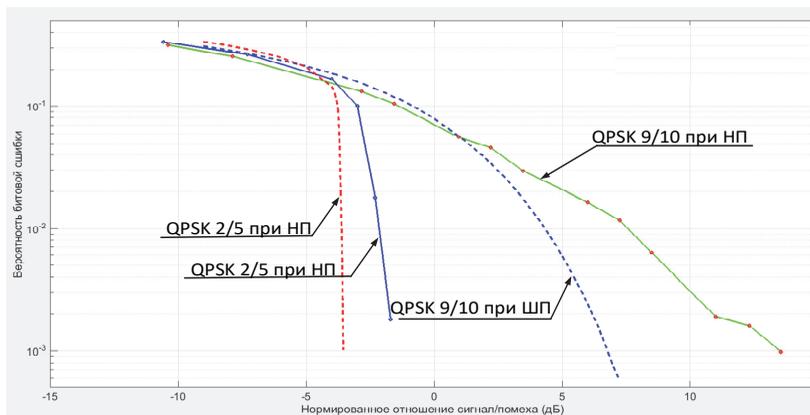


Рис. 10. График вероятности битовой ошибки для сигналов с видом модуляции QPSK и скоростью помехоустойчивого кодирования 2/5 и 9/10 стандарта DVB-S2 к воздействию шумовых непрерывных и нестационарных помех

В ходе исследования определено, что каскадное помехоустойчивое кодирование, применяемое в стандарте DVB-S2, позволяет успешно

исправлять возникающие ошибки при воздействии НП для низких (1/4, 1/3) скоростей кодирования и представляет опасность для более высоких (2/5, 3/4, 4/5, 5/6, 8/9 и 9/10) скоростей кодирования, увеличивая $P_{\text{ош}}$.

Большой эффект от воздействия прерывистой во времени НП при определенных значениях ρ по сравнению с ШНП той же средней мощности объясняется концентрацией энергии помехи в некоторой временной области сигнала, что приводит к искажению некоторого количества информационных символов, которые не могут быть исправлены декодером. При этом средняя мощность помехи определяется ее дисперсией.

3. Модель канала спутниковой связи с псевдослучайной перестройки рабочей частоты. Одним из наиболее известных способов повышения помехозащищенности спутникового ретранслятора является использование расширения спектра за счет псевдослучайной перестройки рабочей частоты (ППРЧ) в заданной полосе частот. В данном режиме происходит скачкообразное изменение номинала несущей частоты, одновременной на всех средствах радиосети по априорно известному абонентам псевдослучайному закону [18]. В зависимости от способа использования элементов информационной символьной последовательности (ИСП) можно выделить сигналы с неинформационной ППРЧ, где очередной номинал рабочей частоты определяется только символами исходной псевдослучайной последовательности (ПСП) и сигналы с информационной ППРЧ, в которых очередной номинал рабочей частоты определяется как символами ПСП, так и символами ИСП. Кроме того, в зависимости от соотношения длительности ИСП номиналов частот различают сигналы с быстрой и медленной ППРЧ. При быстрой ППРЧ каждый информационный символ передается одним или несколькими частотными элементами. При медленной ППРЧ каждый частотный элемент переносит более одного информационного символа.

Аналитически сигналы при медленной информационной ППРЧ, которые рассматриваются в работе, могут быть записаны в соответствии с выражением [18]:

$$S_{\text{ми}}(t) = \sum_l \sum_m S \cdot \text{rect} \left[t - (l-1) \cdot T_{\text{ц}} - (m-1) \cdot \tau_{\text{и}} \right] \cdot \sin \left[\left(\omega(n_l + s_q) \cdot t + \Theta_0 \right) \right], \quad (8)$$

где $\text{rect} \left[t^* \right] = \begin{cases} 1, & \text{при } (m-1) \cdot \tau_{\text{и}} \leq t^* \leq m\tau_{\text{и}} \\ 0, & \text{при } (t^* < (m-1) \cdot \tau_{\text{и}}, t^* > m\tau_{\text{и}}) \end{cases}$ — функция прямо-

угольного импульса; l — номер шага программы, $l=1 \dots L$, L — количество символов последовательности номиналов частот, составляющих период; $m=1 \dots M$, M — количество символов ИСП, передаваемых на очередном шаге программы; q — номер текущего символа $q=1 \dots Q$,

Q — количество передаваемых символов ИСП (при медленной ППРЧ $q=(M-1)l+m$); $\tau_{и}$ — длительность элементарного импульса (посылки), соответствующего единичному символу ИСП; $T_{ц}$ — цикл ППРЧ; S — амплитуда сигнала; Θ_0 — начальная фаза сигнала; ω — частота сигнала; n_l — символы последовательности номеров частотных каналов, определяющих значение несущей частоты сигнала на l -ом шаге программы; s_q — значение q -го символа ИСП.

На основании математической модели в программной среде Matlab была построена имитационная модель функционирования, структурная схема канала спутниковой связи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты в условиях воздействия нестационарных помех которой показана на рисунке 11.

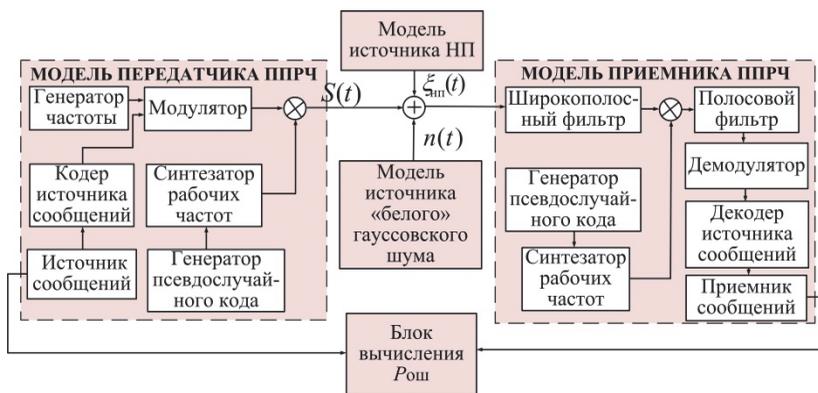


Рис. 11. Структурная схема модели канала связи с ППРЧ в условиях воздействия нестационарных помех

Данная схема при цифровой одноканальной модуляции включает в себя следующие основные элементы: модель передатчика ППРЧ, модель приемника ППРЧ, модель источника нестационарных помех. В качестве исходных данных при моделировании принято следующее: в канале связи осуществляется медленная информационная ППРЧ с видами модуляции BPSK, QPSK, 8-PSK.

Принцип работы представленной схемы состоит в следующем. На один вход умножителя подается сигнал на промежуточной частоте с выхода модулятора, на второй вход — частота с выхода синтезатора рабочих частот, при этом синтезатор рабочих частот вырабатывает ряд частот, которые по определенному закону, определяемому генератором псевдослучайного кода, подаются на вход умножителя. Частота

сигнала в радиолинии будет изменяться в соответствии с этим законом. На приемной стороне осуществляется обратная операция за счет синхронной работы синтезатора рабочих частот приемника и передатчика. Так, на рисунке 12 представлены передаваемые (белым цветом) и принимаемые символы (темная область) в виде сигнальных созвездий для соотношения помеха/сигнал 12 дБ.

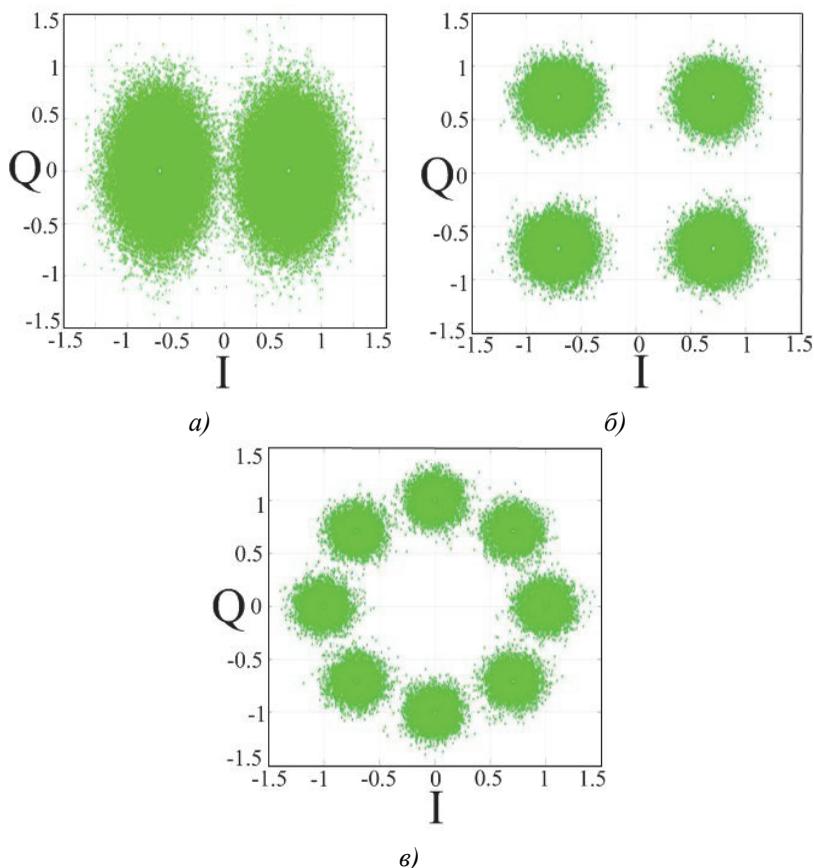


Рис. 12. Сигнальные созвездия для модуляции: а) BPSK, б) QPSK, в) 8-PSK

В качестве примера работы разработанной модели передатчика в соответствии с описанной схемой на рисунках 13 и 14 показано временное и частотное представление сигналов канала с ППРЧ и видом моду-

ляции BPSK. При этом сетка несущих частот расположена в диапазоне 100-120 кГц, а число возможных изменений частотных позиций — 6.

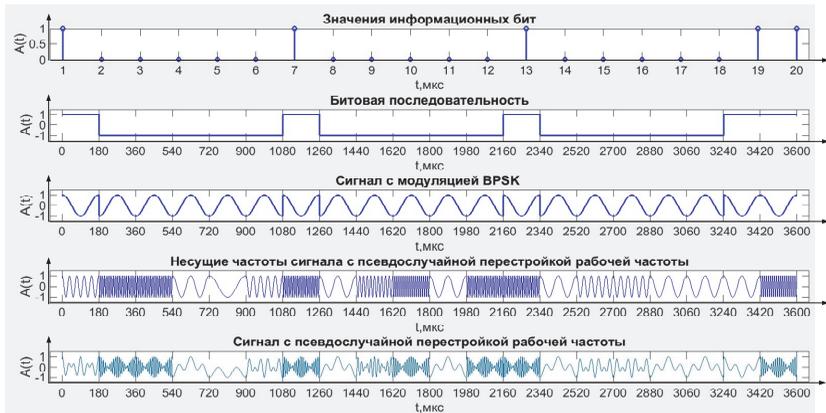


Рис. 13. Временные диаграммы работы передатчика ППРЧ

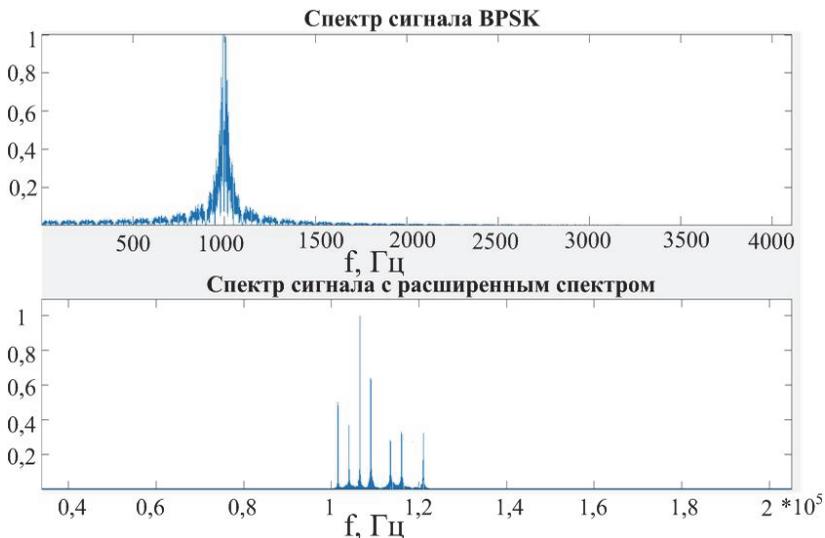


Рис. 14. Спектр исходного сигнала и сигнала с ППРЧ

4. Сравнительная характеристика помехоустойчивости современных каналов спутниковой связи к воздействию нестационарных помех. С помощью разработанных имитационных моделей каналов спутниковой связи проведены исследования помехоустойчивости стандартов DVB-RCS, DVB-S2 с наибольшей скоростью поме-

хоустойчивого кодирования и каналов с ППРЧ к воздействию нестационарных помех и получены графические зависимости вероятностей битовой ошибки от отношения сигнал/помеха (рисунок 15). Кроме того, на данном рисунке приведены те же зависимости в условиях воздействия НП со значениями коэффициента ρ , максимизирующими $P_{\text{ош}}$.

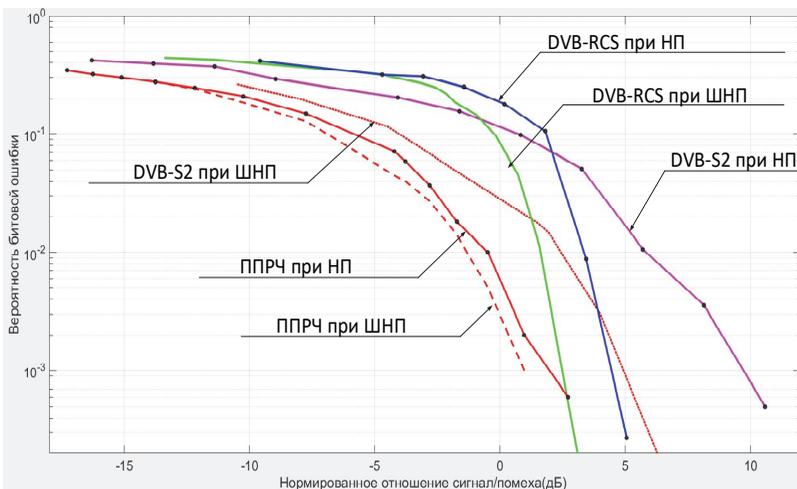


Рис. 15. Сравнительная характеристика помехоустойчивости стандартов DVB-RCS (8PSK, 6/7), DVB-S2 (8PSK, 9/10) и ППРЧ/8PSK к воздействию НП и ШНП

Анализ данных зависимостей для стандарта DVB-RCS показывает, что при низких уровнях отношений сигнал/помехи (от -10 до 3 дБ) НП оказывают меньше вреда, нежели обычные шумовые. В то же время, если отношение сигнал/помеха достаточно высоко (>3 дБ), помехи такого класса при определенных значениях ρ могут быть более опасными, чем шумовые, увеличивая вероятность битовой ошибки с 10^{-4} до 10^{-1} (для случая 3.7 дБ). Стандарт DVB-S2 обладает меньшей помехоустойчивостью, по сравнению с DVB-RCS.

Для канала с ППРЧ серьезных отличий в воздействии НП и обычных шумовых помех не выявлено. В то же время увеличение вероятности битовой ошибки, вызванное воздействием НП с коэффициентами $\rho=0.3 \dots 0.5$, соотносится с известными результатами о требованиях к характеристикам средств подавления по обеспечению «накрытия» сигнала помехой на 45-50 % независимо от того, каким способом это было достигнуто [18].

5. Заключение. Приемные устройства современных систем спутниковой связи могут функционировать в условиях воздействия

непреднамеренных НП. Помехоустойчивость известных стандартов DVB-RCS и DVB-S2 в случае воздействия непрерывной шумовой и нестационарной помех существенно различается. Степень этого различия зависит от выбранных параметров информационных и временных параметров помехи. Показано, что с ростом отношения сигнал/помеха НП оказывают более опасное воздействие на канал связи по сравнению с ШНП той же мощности.

В ходе исследования определено, что каскадное помехоустойчивое кодирование, применяемое в стандарте DVB-S2, позволяет успешно исправлять возникающие ошибки при воздействии НП для низких (1/4, 1/3) скоростей кодирования и представляет опасность для более высоких (2/5, 3/4, 4/5, 5/6, 8/9 и 9/10) скоростей кодирования увеличивая вероятность битовой ошибки.

В целом стандарт DVB-RCS является более устойчивым к воздействию НП по сравнению с DVB-S2. Наиболее помехоустойчив к воздействию данных помех — канал связи с ППРЧ, однако он обладает меньшей эффективностью использования частотного ресурса ретранслятора.

Таким образом, в целях обеспечения электромагнитной совместимости современных земных станций спутниковой связи необходимо учитывать выявленные особенности стандартов связи при организации их эксплуатации.

Литература

1. *Новиков Е.А.* Применение моделей структурной динамики при решении задачи распределения частотно-временного ресурса сети спутниковой связи на основе стандарта DVB-RCS // Информационно-управляющие системы. 2013. № 3. С. 78–83.
2. *Кащеев А.А.* Повышение частотной эффективности сети спутниковой связи передачи данных // Системы, сети и устройства телекоммуникаций. 2013. № 1. С. 37–42.
3. *Генов А.А., Решетников В.Н.* Адаптивное управление частотно-временным ресурсом космических аппаратов в сетях спутниковой связи // Информационные технологии и вычислительные системы. 2008. №3. С. 55–62.
4. *Генов А.А., Осипов В.В., Савилкин С.Б.* Принципы реализации сети спутниковой связи стандарта DVB-RCS с пространственно-частотно-временным разделением ресурса на основе многолучевых АФАР X-диапазона // Труды МАИ. Вып. № 87.
5. ESTI EN 301 790 V1.4.1. Digital Video Broadcasting (DVB); Interaction channel for Satellite Distribution Systems // European Standard (Telecommunications series). 2005. 117 p.
6. *Сатдинов А.И. и др.* Повышение частотно-энергетической эффективности радиолиний спутниковой связи в режиме псевдослучайной перестройки рабочей частоты // Альманах современной науки и образования. 2016. №4 (106). С. 109–112.
7. *Паршуткин А.В. и др.* Исследование помехоустойчивости канала спутниковой связи стандарта DVB-S2 к воздействию нестационарных помех // Вопросы оборонной техники. Технические средства противодействия терроризму. Серия 16. 2016. Вып. 9–10. С. 89–95.

8. *Маслаков П.А., Париуткин А.В., Фомин А.В.* Модель функционирования канала спутниковой связи при воздействии нестационарных помех // Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. 2016. Вып. 651. С. 78–83.
9. *Маслаков П.А, Пилков А.В., Швецов А.В.* Модель функционирования канала связи с прямым расширением спектра в условиях воздействия непреднамеренных нестационарных помех // Технологии ЭМС. 2016. №3(58). С 51–56.
10. ETSI EN 302 307 V1.2.1. Digital Video Broadcasting (DVB); Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications (DVB-S2) // European Standard (Telecommunications series). 2009. 78 p.
11. *Семенов К.В.* Описательная модель спутниковых сетей связи на базе технологии многочастотного множественного доступа с временным разделением // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2010. Вып. 628. С. 98–110.
12. *Макаренко С.И.* Динамическая модель системы связи в условиях функционально-разно-уровневого информационного конфликта наблюдения и подавления // Системы управления, связи и безопасности. 2015. № 3. С. 122–184.
13. *Surekha T.P., Ananthapadmanabha T., Puttamadappa C.* C-Band VSAT Data Communication System and RF Impairments // International Journal of Distributed and Parallel Systems (IJDPSS). 2012. vol.3. pp. 339–355.
14. *Balta H., Lucaciu R., Gajitzki P., Isar A.* QPP Interleaver Based Turbo-code For DVB-RCS Standard// 4th International Conference on Computer Modeling and Simulation (ICCMS 2012). 2012. pp. 108–113.
15. *Будьлодина Н.В., Трухин М.П.* Компьютерный генератор моделей помех в телекоммуникациях // Т-Comm – Телекоммуникации и Транспорт. 2014. № 8. С. 8–13.
16. *Савищенко Н.В. и др.* Расчет вероятности битовой и символической ошибок для канала связи при приеме сигнальных конструкций стандарта DVB-S2 // Информатика и космос. 2015. № 1. С. 9–15.
17. *Крецуц А.А., Зяблов В.В., Потанов В.Г.* Сигнально-кодовые конструкции для работы в условиях мощных полосовых помех // Труды СПИИРАН. 2016. Вып. 3(46). С. 14–26.
18. *Обухов А.Н.* Частотно-временные аспекты защиты информации в системах радиосвязи // М.: Экслибрис-Пресс. 2008. 212 с.

Паршуткин Андрей Викторович — д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры систем и средств радиоэлектронной борьбы космического назначения, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского (ВКА им. А.Ф. Можайского). Область научных интересов: радиоэлектронная защита радиоэлектронных средств и систем, методы оценивания результативности помех и радиоэлектронных воздействий, методы создания интеллектуальных помех и защиты от них, методы и средства технической защиты информации. Число научных публикаций — 86. andydc2010@mail.ru; ул. Ждановская, 13, Санкт-Петербург, 197198; п.т.: +7(812)347-95-35, Факс: +7(812) 237-12-49.

Маслаков Павел Андреевич — адъюнкт кафедры систем и средств радиоэлектронной борьбы космического назначения, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского (ВКА им. А.Ф. Можайского). Область научных интересов: радиоэлектронная защита радиоэлектронных средств и систем, методы создания интеллектуальных помех, помехоустойчивость систем спутниковой связи. Число научных публикаций — 17. maslakov345@yandex.ru; ул. Ждановская, 13, Санкт-Петербург, 197198; п.т.: +7(812)347-95-35, Факс: +7(812) 237-12-49.

A.V. PARSHUTKIN, P.A. MASLAKOV
**STUDY OF THE NOISE IMMUNITY OF MODERN STANDARDS
 OF SATELLITE COMMUNICATIONS TO THE IMPACT OF NON-
 STATIONARY INTERFERENCE**

Parshutkin A.V., Maslakov P.A. Study of the Noise Immunity of Modern Standards of Satellite Communications to the Impact of Non-Stationary Interference.

Abstract. This article considers the model of impact of non-stationary interference on the satellite communications channels of standard DVB-S and DVB-RCS, and also on the channels with frequency-hopping spread spectrum. The results of the impact of unintentional non-stationary interference on the satellite communications channels, which occurs from stationary and mobile sources of interference with the same average power, were compared. The bit error probability is used as a measure of noise immunity of satellite communications channels. In the article the term time coefficient of the disturbance noise existence was introduced. Its essence is to substantiate the degree of noise energy concentration in some time area of the desired signal. As an indication, characterizing noise immunity of data lines to the influence of unsteady noises the bit-error probability was chosen. It depends on the time coefficient of the disturbance noise existence. In the definite period of time coefficient of the unsteady noise existence for low signal-to-noise ratio they can have a more dangerous effect on data lines with FHSS than the continuous disturbance noise increasing the bit-error possibility.

Keywords: DVB-S2, DVB-RCS, frequency-hopping spread spectrum, non-stationary interference, noise immunity, lifetime of interference factor.

Parshutkin Andrey Viktorovich — Ph.D., Dr. Sci., professor, professor of systems and electronic warfare systems for space applications department, Mozhaisky Military Space Academy. Research interests: electronic protection of electronic equipment and systems, methods of estimating the impact of noise and electronic influences, methods of creation of intellectual interference and protection, methods and means of technical protection of information. The number of publications — 86. andydc2010@mail.ru; 13, Zhdanovskaya street, St.-Petersburg, 197198, Russia; office phone: +7(812)347-95-35, Fax: +7(812) 237-12-49.

Maslakov Pavel Andreevich — Ph.D. student of systems and electronic warfare systems for space applications department, Mozhaisky Military Space Academy. Research interests: electronic protection of electronic equipment and systems, methods of estimating the impact of noise and electronic influences, methods of creation of intellectual interference and protection, immunity of satellite communication systems. The number of publications — 17. maslakov345@yandex.ru; 13, Zhdanovskaya street, St.-Petersburg, 197198, Russia; office phone: +7(812)347-95-35, Fax: +7(812) 237-12-49.

Reference

1. Novikov E.A. [Application of models of structural dynamics in solving the problem of distribution of the frequency-time resource of a satellite communication network based on the DVB-RCS standard]. *Informacionno-upravljajushhie sistemy – Information and Control Systems*. 2013. vol. 3. pp. 78–83. (In Russ.).
2. Kashheev A.A. [Increase the frequency efficiency of the satellite data communication network]. *Sistemy, seti i ustrojstva telekommunikacij – Systems, networks and telecommunications devices*. 2013. vol. 1. pp. 37–42. (In Russ.).
3. Genov A.A., Reshetnikov V.N. [Adaptive management of time-frequency resources of space vehicles in satellite communication networks]. *Informacionnye tehnologii i*

- vychislitel'nye sistemy – Information technologies and computer systems*. 2008. vol. 3. pp. 55–62. (In Russ.).
4. Genov A.A., Osipov V.V., Savilkin S.B. [Principles for the implementation of the DVB-RCS satellite communication network with space-time-frequency resource sharing based on X-band multi-path active phased array antenna]. *Trudy MAI – Trudy MAI*. vol. 87. (In Russ.).
 5. ESTI EN 301 790 V1.4.1. Digital Video Broadcasting (DVB); Interaction channel for Satellite Distribution Systems. European Standard (Telecommunications series). 2005. 117 p.
 6. Satdinov A.I et al. [Increase in the frequency-energy efficiency of satellite communications radio links in the mode of pseudo-random tuning of the operating frequency]. *Al'manah sovremennoj nauki i obrazovanija – Almanac of Modern Science and Education*. 2016. vol. 4(106). pp. 109–112. (In Russ.).
 7. Parshutkin A.V. et al. [Study of noise immunity of the satellite communication channel of the DVB-S2 standard to the effect of non-stationary interference]. *Voprosy obozromnoj tehniki. Tehnicheskie sredstva protivodejstvija terrorizmu. Serija 16 – Engineering Problems. Scientific and Technical Journal. Series 16. Anti-Terrorist Engineering Means*. 2016. vol. 9–10. pp. 89–95. (In Russ.).
 8. Maslakov P.A., Parshutkin A.V., Fomin A.V. [The model of the functioning of the satellite communication channel under the influence of non-stationary interference]. *Trudy Voенno-kosmicheskoy akademii im. A.F.Mozhajskogo – Proceedings of the Mozhaisky Military Space Academy*. 2016. vol. 651. pp. 78–83. (In Russ.).
 9. Maslakov P.A., Pilkov A.V., Shvecov A.V. [The model of the functioning of a communication channel with direct spreading in the presence of unintended non-stationary interference]. *Tehnologii JeMS – Technologies of electromagnetic compatibility*. 2016. vol. 3(58). pp. 51–56. (In Russ.).
 10. ETSI EN 302 307 V1.2.1. Digital Video Broadcasting (DVB); Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications (DVB-S2). European Standard (Telecommunications series). 2009. 78 p.
 11. Semenov K.V. [A descriptive model of satellite communication networks based on the multi-frequency multiple-access technology with time division]. *Trudy Voенno-kosmicheskoy akademii imeni A.F.Mozhajskogo – Proceedings of the Mozhaisky Military Space Academy*. 2010. vol. 628. pp. 98–110. (In Russ.).
 12. Makarenko S.I. [Dynamic model of the communication system in conditions of a functionally different-level information conflict of observation and suppression]. *Sistemy upravlenija, svyazi i bezopasnosti – Systems of Control, Communication and Security*. 2015. vol. 3. pp. 122–184. (In Russ.).
 13. Surekha T.P., Ananthapadmanabha T., Puttamadappa C. C-Band VSAT Data Communication System and RF Impairments. *International Journal of Distributed and Parallel Systems (IJDPDS)*. 2012. vol. 3. pp. 339–355.
 14. Balta H., Lucaci R., Gajitzki P., Isar A. QPP Interleaver Based Turbo-code For DVB-RCS Standard. 4th International Conference on Computer Modeling and Simulation (ICCMS 2012). 2012. pp. 108–113.
 15. Budyldina N.V., Trukhin M.P. [Computer generator of interference models in tele-communications]. *T-Comm – Telekomunikacii i Transport – T-Comm – Telecommunications and Transport*. 2014. vol. 8. pp. 8–13. (In Russ.).
 16. Savishhenko N.V. et al. [Calculation of the probability of bit and symbol errors for the communication channel when receiving signal structures of the DVB-S2 standard]. *Informacija i kosmos – Information and Space*. 2015. vol. 1. pp. 9–15. (In Russ.).
 17. Kreshhuk A.A., Zjablov V.V., Potapov V.G. [Signal-code constructions for operation under conditions of high-band-pass interference]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*. 2016. vol. 3(46). pp. 14–26. (In Russ.).
 18. Obuhov A.N. *Chastotno-vremennye aspekty zashchity informatsii v sistemakh radio-svyazi* [Time-frequency aspects of information protection in radio communication systems], M.: Jekslibris-Press. 2008. 212 p. (In Russ.).

Е.А. ШУШЛЯПИН, В.А. КАРАПЕТЬЯН, А.Е. БЕЗУГЛАЯ, А.А. АФОНИНА НЕЛИНЕЙНЫЕ РЕГУЛЯТОРЫ ДЛЯ УДЕРЖАНИЯ СУДНА НА ЗАДАННОЙ ТРАЕКТОРИИ ПРИ «СИЛЬНЫХ» МАНЕВРАХ

Шушляпин Е.А., Карапетьян В.А., Безуглая А.Е., Афонина А.А. Нелинейные регуляторы для удержания судна на заданной траектории при «сильных» маневрах.

Аннотация. Исследования являются частью работ по созданию маломерного роботизированного научно-исследовательского судна для комплексного экологического мониторинга морской прибрежной акватории Черного моря, а также озер и рек, с базированием в Севастополе. На основе сформированной аналитической нелинейной модели судна катамаранного типа с двумя винторулевыми колонками, учитывающей его массогабаритные и тяговые характеристики, разработаны первоначальный и упрощенный способы управления угловой скоростью и курсом судна при «сильных» маневрах с использованием метода конечных состояний. Под «сильными» маневрами в судовождении понимаются маневры с большими углами перекладки рулей, когда линеаризованные модели судов неприменимы. Разработанные способы управления имеют вид простых структур, явно зависящих от задающего воздействия, длины судна, упоров винторулевых колонок, момента инерции судна, а также известных нелинейных функций текущего состояния — скоростей по продольной и поперечной осям судна, угловой скорости и угла поворота винторулевых колонок. В упрощенном способе значения измерений скоростей не используются.

Ключевые слова: нелинейные системы, катамаран, удержание судна на траектории, управление угловой скоростью, управление курсом, метод конечного состояния, сильные маневры.

1. Введение. Исследования выполнены в рамках госбюджетных НИР, являющихся составной частью работ по созданию маломерного роботизированного научно-исследовательского судна для комплексного экологического мониторинга морской прибрежной акватории Черного моря, а также озер и рек, с базированием в г. Севастополе, в частности, для безэкипажного режима эксплуатации судна. Для удержания судна на предварительно спланированном маршруте необходимо управлять им в автоматическом режиме таким образом, чтобы в случае отклонения от маршрута судно возвращалось на маршрут. При этом могут быть ситуации (при обходе внезапно появившегося препятствия, при движении в узкостях и т.п.), когда маневр судна производится при большом угле перекладки руля или поворота винторулевой колонки (ВРК). При этом динамика судна оказывается нелинейной и методы управления должны быть адекватными. В судовождении такие маневры судна называют «сильными» [1].

Особенности задачи удержания судна на маршруте, а также специфика математических моделей судна ограничивают спектр возможных методов управления для успешного решения поставленной задачи.

В значительной степени это касается полученной нами нелинейной модели судна [2]. Для решения задачи управления судном при

«сильных» маневрах, когда линеаризация модели затруднительна и нет возможности применять модальные регуляторы [3] или другие для линейных стационарных систем, известны несколько методов, которые в принципе можно применить.

Во-первых, отметим способы, защищенные патентами [4, 5]. Суть данных изобретений в том, что, во-первых, управление осуществляется по информации от спутников и бортовых измерителей, а во-вторых, с использованием «инженерных» приемов формирования управляющих сигналов, то есть интуитивно понятных алгоритмов, которые не требуют использования математической модели судна. Так, например, угол отклонения пера руля (перекладки) рассчитывается путем численного решения дифференциального уравнения [4]:

$$\frac{d\delta}{dt} = k_1(K - K^*) + k_2\omega - k_3\delta,$$

где δ, K, K^*, ω — угол перекладки руля, текущий курс, заданный курс, угловая скорость поворота судна вокруг центра масс; k_1, k_2, k_3 — неопределенные коэффициенты.

При использовании носовых подруливающих устройств предлагается дополнительно использовать алгоритм в виде дифференциального уравнения относительно поперечной управляющей силы [5]:

$$\frac{dP}{dt} = k_1\beta + k_2 \int \beta dt - k_3P,$$

где β, P — угол дрейфа судна и поперечная управляющая сила на выходе подруливающего устройства соответственно; k_1, k_2, k_3 — неопределенные коэффициенты.

При этом используются алгоритмы расчета «упреждающих» точек, от которых реализуются предварительно рассчитанные программные управления для поворота судна на новый курс, а также условия обратного включения режима стабилизации вдоль заданного курса K^* .

Общим недостатком указанных методов, а также и других (например, [6, 7]), основанных на использовании линейных и нелинейных обратных связей от координат состояния, является то, что они содержат неопределенные коэффициенты, которые заранее неизвестны и могут зависеть от условий функционирования. Для приспособления к условиям функционирования используются принципы адаптивного и

интеллектуального управления [8, 9]. В меньшей степени такие недостатки присущи методам, основанным на использовании математических моделей объекта управления [10–12].

Часто при синтезе нелинейных систем используются методы для решения обратной задачи динамики. К ним относятся: «линеаризационный по входу/выходу метод (ЛМ)» [13, 14], метод Батенко [15], а также «метод конечного состояния (МКС)» [16]. Метод [13, 14] предназначен для решения задач стабилизации или слежения и по назначению подходит для задачи удержания судна на маршруте. Другие два метода [15, 16] являются терминальными, то есть предназначены для приведения системы в заданный момент времени к заданному состоянию. Их применение к задаче удержания судна на маршруте возможно при разбиении интервала времени функционирования системы на малые интервалы, на каждом из которых применяется терминальный метод.

Имеются и другие методы, которые относят к современным — дифференциально-геометрические [17], на основе искусственных нейронных сетей [18], нечеткой логики [19].

Критериями для выбора метода решения поставленной задачи являлись следующие: математическая модель судна; постановка задачи управления; опыт разработчиков; простота и возможность практической реализации. С учетом указанных критериев были выбраны ЛМ и МКС. При этом не последнюю роль играло то, что указанные два метода опробованы на реальном оборудовании [20, 21].

В процессе анализа применения ЛМ и МКС была выявлена практическая невозможность применения ЛМ к модели судна ввиду чрезвычайно сложных выражений для управления, которые к тому же оказались крайне чувствительными к вычислительным погрешностям. В то же время для более простых моделей, например линеаризованных, ЛМ может оказаться пригодными.

2. Математическая модель судна. Математические модели для применения МКС и ЛМ должны относиться к классу аффинных систем или систем с линейно входящим (аддитивным) управлением вида:

$$\begin{aligned} \frac{dz}{dt} &= \Phi(t, z) + B(t, z)u, \\ t &\in [t_0, t_f], \quad z(t_0) = z^0, \end{aligned} \quad (1)$$

где z — n -мерный вектор состояния; u — r -мерный вектор управления; t_0, t_f — начальное и конечное время функционирования системы; z^0 — вектор начальных условий. При этом элементы вектор-функции Φ предполагаются дифференцируемыми по всем своим аргументам.

Математическая модель получена в [2] по методикам [1, 22] при предположении о безынерционности приводов ВРК. В соответствии с постановкой задачи управления, управление судном производится посредством поворота двух ВРК на один и тот же угол δ при заданных одинаковых упорах $Tv1, Tv2$ обеих ВРК, то есть $Tv1 = Tv2 = Tv$.

Вектор состояния судна состоит из семи компонент:

$$z = colon(V_x, V_y, \omega, x_1, y_1, K, \delta)$$

где δ, K, ω определены выше; V_x, V_y, x_1, x_2 — соответственно, скорости и положения центра масс (ЦМ) судна в направлениях продольной и поперечной его осей. При этом седьмая компонента $\delta \equiv z_7$, являющаяся, по сути, управляющим воздействием, входит в уравнения модели судна неаддитивно (см. ниже). Для приведения системы к аффинному виду ее вектор состояния расширен на одну компоненту $z_7 \equiv \delta$ с дифференциальным уравнением для нового состояния:

$$\frac{d\delta}{dt} = u, \quad (2)$$

где u — новое управляющее воздействие. Преобразованная система седьмого порядка, в соответствии с формой (1) и расширенным вектором состояния, будет иметь следующие составляющие:

$$\Phi(t, z) := \begin{pmatrix} \frac{2 \cdot Tv1 \cdot \cos(z_7) - R_x(z) - m_y \cdot z_3 \cdot z_2}{m_x} \\ \frac{2 \cdot Tv1 \cdot \sin(z_7) - m_x \cdot z_3 \cdot z_1}{m_y} \\ \frac{L \cdot Tv1 \cdot \sin(z_7) + M_{rez}(z) + M_D(z) - z_1 \cdot z_2 \cdot (m_x - m_y)}{J_w} \\ V(z) \cdot \cos(z_6 - \beta(z)) \\ V(z) \cdot \sin(z_6 - \beta(z)) \\ z_3 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$B(t, z) := colon(0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1) \quad (4)$$

Функции состояния $V, R_x, R_y, M_K, M_D, \beta$ через переменные z определяются выражениями [1, 20]:

$$V = \sqrt{z_1^2 + z_2^2}, \quad \beta = \arctg\left(\frac{z_2}{z_1}\right), \quad (5)$$

$$R_x(V, z_1, z_2) = 2000 \cdot R_K \cdot V \cdot \cos \beta, \quad (6)$$

$$R_y(V, z_1, z_2) = 2000 \cdot R_K \cdot V \cdot \sin \beta, \quad (7)$$

$$R_K(V) = 8,1 - 8,436 \cdot V + 2,536 \cdot V^2, \quad (8)$$

$$M_K(V, z_1, z_2) = R_y(V, z_1, z_2) \cdot l_K, \quad (9)$$

$$l_K = 0,4 \cdot L \cdot \left(0,5 - \frac{\beta}{\pi}\right),$$

$$M_D(V, z_3) = -0,148 \frac{\rho}{2} V \cdot 24,092 \cdot L^2 z_3, \quad (10)$$

В выражениях (3 – 10) V — результирующая скорость судна в системе координат, связанной с судном; R_x, R_y — силы сопротивления судна в продольном и поперечном направлениях с учетом двух корпусов катамарана и преобразованием размерности силы из килоньютонов в ньютонь; R_K — аппроксимированная полиномом зависимость сопротивления судна (в килоньютонах) R_K от скорости хода (в $m \cdot s^{-1}$), полученная путем моделирования судна в среде OpenFOAM; L — длина судна в метрах; m_x, m_y — массы судна с учетом присоединенных масс воды в продольном и поперечном движениях.

Массы и момент из (3) определяются соотношениями [22]:

$$m_x = (1 + k_{11})D, \quad m_y = (1 + k_{22})D, \quad J_\omega = (1 + k_{66})J_Z, \quad (11)$$

где J_Z — момент инерции судна; D — весовое водоизмещение (масса) судна в килограммах. Коэффициенты присоединенных масс и момента выбираются из диапазонов: $k_{11} = 0.05 \div 0.15$; $k_{22} = 0.7 \div 1.2$; $k_{66} = 0.6 \div 1.3$. Для рассматриваемого судна малого водоизмещения $D = 155000$ кг взяты нижние границы указанных коэффициентов.

3. Решение задачи удержания судна на заданном курсе методом конечного состояния. Как отмечалось во введении, из рассмотренных методов, пригодных для решения задачи по указанным там же критериям, ЛМ оказался очень сложным и практически неприменимым. Поэтому воспользуемся терминальным методом конечного состояния (МКС) [16].

Метод конечного состояния разработан для решения задач терминального управления нелинейными аффинными системами с гладкими функциями в критерии и динамических ограничениях разного рода (дифференциальных, дифференциальных с запаздываниями, конечно-разностных и др.). Для рассматриваемой задачи критерий имеет вид гладкой функцией конечного состояния:

$$J = J(z(t_f)) \rightarrow J^*, \quad (12)$$

а ограничения — вид дифференциальных уравнений (1).

Управление в данном методе (МКС-управление) рассчитывается по выражениям:

$$\begin{aligned} u(t, z(t)) &= G^+ \cdot f_J, \\ G^+ &= G^T (GG^T)^{-1}, \\ G &= \left. \frac{\partial J(z)}{\partial z} \right|_{z=\bar{z}(t_f, t, z(t))} \cdot W(t_f, t, z(t)) B(t, z(t)), \end{aligned} \quad (13)$$

где $f_J = (J^* - J(\bar{z}(t_f, t, z(t))))/T_u$ — правая часть дифференциального

уравнения $\frac{dJ}{dt} = \frac{J^* - J}{T_u}$, которое задает экспоненциальное с постоянной

времени T_u приближение критериальной функции времени t

$J(\bar{z}(t_f, t, z(t)))$ к желаемому значению J^* , что имеет место при до-

статочно малом $T_u \ll t_f$. При переменном во времени $T_u = t_f - t$

форма линии, по которой критериальная функция «приближается» к J^* , уже не экспонента, а прямая.

В выражениях (13) используются переменные конечного состояния (ПКС) \bar{z} и нелинейная переходная матрица (ПМ) В. М. Алексеева [23], определяемая совместной системой дифференциальных уравнений:

$$\frac{d\bar{z}(\vartheta, t, z(t))}{d\vartheta} = \Phi(\vartheta, \bar{z}),$$

$$\frac{dW(\vartheta, t, z(t))}{d\vartheta} = \left. \frac{\partial \Phi(\vartheta, z)}{\partial z} \right|_{z=\bar{z}(\vartheta, t, z(t))} \cdot W, \quad (14)$$

$$\vartheta \in [t, t_f], \bar{z}(t, t, z(t)) = z(t), W(t, t, z(t)) = I,$$

где I — единичная матрица.

Заметим, что ПКС и ПМ в (13) нужны как функции второго аргумента t , а по (14) они определяются как функции первого аргумента ϑ для каждого из значений t .

Для применения данного метода к задаче удержания судна на заданной траектории разобьем временной интервал $[t_0, t_f]$ на N малых интервалов длительностью $h = t_{i+1} - t_i$ и преобразуем (14) в предположении малости указанных интервалов. В результате с учетом $W(t_i, t_i, z(t_i)) = I$ (см. начальные условия в (14)) получаются следующие приближенные выражения:

$$\bar{z}(t_{i+1}, t_i, z(t_i)) = z(t_i) + \Phi(t_i, z(t_i)) \cdot h,$$

$$W(t_{i+1}, t_i, z(t_i)) = I + \left[\frac{\partial \Phi(t_i, z)}{\partial z} \right]_{z=z(t_i)} \cdot h, \quad (15)$$

$$i = 1, 2, \dots, N.$$

Чтобы удержать судно на заданном курсе $K^* \equiv z_6^*$, зададимся косвенным критерием:

$$J = z_3(t) \rightarrow z_3^*(t), \quad (16)$$

где $z_3^*(t) = \omega^*(t)$ — заданное поведение угловой скорости. Из шестого уравнения системы (1), (3) для угла курса $dz_6/dt = z_3$, при постоянной угловой скорости $z_3(t) = const = z_3^* = \omega^*$ следует:

$$z_6^* = z_6(t_0) + \int_{t_0}^{t_1} \omega^* dt = z_6(t_0) + \omega^* \cdot (t^* - t_0),$$

$$t^* = t_0 + \frac{z_6^* - z_6(t_0)}{\omega^*},$$

$$z_3^*(t) = if(t < t^*, \omega^*, 0).$$
(17)

Второе выражение из (17) определяет тот момент t^* , когда судно выйдет на заданный курс z_6^* . Поэтому переменное во времени задающее воздействие $z_3^*(t)$ вычисляется с помощью условного выражения, записанного в третьей строке (17) по правилам записи таких выражений в MathCAD (если условие $t < t^*$ истинно, то $z_3^*(t) = \omega^*$, иначе $z_3^*(t) = 0$). При этом произойдет мгновенное изменение величины задающего воздействия, что может привести к нежелательному переходному процессу. Для плавного выхода на заданный курс можно реализовать ступенчатый процесс, как это часто практикуется в технических системах, например, при мягком пуске электродвигателей.

Таким образом, посредством критерия (16), могут быть решены разнообразные задачи. Задавая $z_3^*(t)$ некоторыми функциями времени, можно получать разные траектории движения судна, например, синусоидальные. При постоянном значении z_3^* , рассчитываемом по выражению (17), получаем выход судна на заданный постоянный курсовой угол z_6^* .

4. Расчет управления и результаты моделирования. Согласно (13), (15), имеем:

$$G = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} W_{11} & \dots & W_{17} \\ \vdots & \dots & \vdots \\ W_{71} & \dots & W_{77} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = W_{37}.$$

$$G^+ = \frac{1}{G} = \frac{1}{W_{37}}.$$

Элемент переходной матрицы W_{37} в соответствии с (15) и с учетом:

$$\Phi_3(t, z) = \frac{L \cdot Tv \cdot \sin(z_7) + M_K(z_1, z_2) + M_D(z_1, z_2) - (m_x - m_y) z_1 z_2}{J_\omega}, \quad (18)$$

определяется следующим выражением:

$$W_{37}(t_{i+1}, t_i, z(t_i)) = 0 + h \cdot \left. \frac{\partial \Phi_3(t_i, z)}{\partial z_7} \right|_{z_7=z_7(t_i)} = \frac{h \cdot L \cdot Tv \cdot \cos(z_7)}{J_\omega}. \quad (19)$$

Тогда, при $f_J = (z_3^* - \bar{z}_3(t_{i+1}, t_i, z(t_i))) / T_u$, получаем следующее выражение для управления:

$$u(t, z) = \frac{z_3^* - \bar{z}_3(t)}{T_u W_{37}(t, z)}, \quad (20)$$

$$\bar{z}_3(t) = z_3 + \Phi_3(t, z) \cdot h.$$

Моделирование показало, что во всяком случае для рассматриваемого судна вместо последней формулы можно использовать упрощенную формулу:

$$u(t, z) = \frac{z_3^* - z_3(t)}{T_u W_{37}(t, z)}. \quad (21)$$

в силу малости функции $\Phi_3(t, z)$ (углового ускорения), которая немного отличается от нуля (порядка 10^{-2}) на начальном (порядка нескольких секунд) временном участке, а затем вообще практически нулевая. Для иллюстрации этого приведем график зависимости $\Phi_3(t, z)$, а также графики переходных процессов для угловой скорости, полученные для $z_3^* = 0.008 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ при управлении (20).

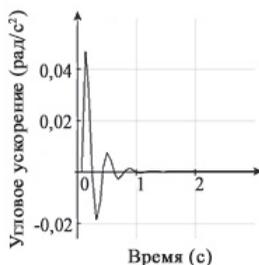


Рис. 1. Зависимость от времени углового ускорения Φ_3 для

$$z_3^* = 0.008 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1} \text{ и управления (20)}$$

Как видно из графиков рисунков 2 и 3, усложненный алгоритм оказывает положительное влияние на качество переходного процесса на начальном временном участке длительностью в несколько секунд. Переходные же процессы по линейным скоростям при этом не имеют перерегулирований как для усложненного (20), так и для упрощенного (21) управлений.

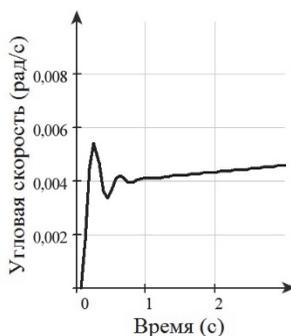


Рис. 2. Зависимость от времени угловой скорости для $z_3^* = 0.008 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ и управления (20)

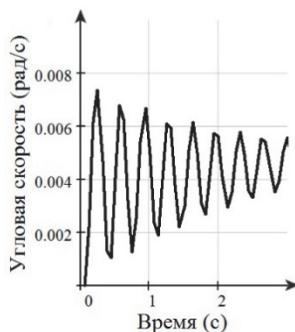


Рис. 3. Зависимость от времени угловой скорости для $z_3^* = 0.008 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ и управления (21)

Следует обратить внимание на то, что от математической модели судна в упрощенном способе (21) используются только его длина L , момент инерции J_Z (пересчитываемый в J_ω по третьей формуле из (11)), а также упор Tv . Используются измеренные в каждый момент

времени значение угловой скорости $z_3(t)$ и задающее значение для угловой скорости, которое может зависеть от времени. В усложненном же способе (20), как следует из (18), используются дополнительно измерения линейных скоростей z_1, z_2 , угла поворота ВРК z_7 , рассчитанные по выражениям (11), (9), (10) присоединенные массы воды m_x, m_y и моменты J_ω, M_K, M_D . Кроме того, используются постоянная времени T_u и шаг h . Произведение $T_u \cdot h$ образует свободный параметр, посредством которого можно регулировать свойства управляемой системы.

Ниже в таблице 1 приведен текст MathCAD-программы, реализующий данный метод.

Таблица 1. Текст MathCAD-программы моделирования движения судна под воздействием упрощенного МКС-управления (21)

Управление угловой скоростью с помощью МКС			
Модель судна			
Водоизмещение в кг: $D := 155000$	$k11 := 0.05$	$k22 := 0.7$	$k66 := 0.6$
$m_x := (1 + k11) \cdot D$	$m_y := (1 + k22) \cdot D$	Плотность воды: $\rho_{ov} := 1.025$	Длина судна (м): $L := 22.3$
Момент инерции через водоизмещение в кг: $J_{zz} := \frac{0.05}{1000} \cdot \rho_{ov} \cdot D \cdot L^2$		Коэффициент полноты корпуса: $\sigma := 0.697$	Осадка (м): $T_m := 1.55$
$A_Ls := L \cdot T_m \cdot \sigma$		Расстояние от ВРК до ДП: $r_{VRK} := 3$	
Скорость судна: $V_{\text{судна}}(z) := \sqrt{(z_1)^2 + (z_2)^2}$		Наклонное расстояние от ВРК до ЦМ: $dn := \sqrt{r_{VRK} \cdot r_{VRK} + L \cdot \frac{L}{4}}$	
Упоры двух ВРК в ньютонах: $T_{v1} := 20400 \quad T_{v2} := 20400$		Угол дрейфа: $\beta(z) := \text{atan}\left(\frac{z_2}{z_1}\right)$	
Расчет момента демпфирующей силы [17]:			

$$Cd := \left(0.739 + 8.7 \cdot \frac{Tm}{L} \right) \cdot \left(1.611 \cdot \sigma^2 - 2.873 \cdot \sigma + 1.33 \right)$$

$$Md(z) := -Cd \cdot V(z) \cdot \frac{rov}{2} \cdot ALs \cdot L^2 \cdot z_3$$

Полиномиальная аппроксимация зависимости силы сопротивления (в Кн) одного корпуса катамарана от скорости (в м/с) по данным моделирования

$$\text{в FOAM: } pp2(xx) := 8.1 - 8.436 \cdot xx + 2.536 \cdot xx^2$$

Проекция силы сопротивления:

$$Rx(z) := 2000 \cdot pp2(V(z)) \cdot \cos(\beta(z))$$

$$Ry(z) := 2000 \cdot pp2(V(z)) \cdot \sin(\beta(z))$$

Момент позиционных сил:

$$Mk(z) := 0.4 \cdot L \cdot \left(0.5 - \frac{\beta(z)}{3.14} \right) \cdot Ry(z)$$

Правые части однородной системы уравнений для судна:

Коэффициенты при управлениях:

$$\Phi(t, z) := \begin{pmatrix} \frac{(2 \cdot Tv1 \times \cos(z_7) \times -Rx(z) - my \times z_3 \times z_2)}{mx} \\ \frac{2 \cdot Tv1 \times \sin(z_7) - mx \times z_3 \times z_1}{my} \\ \frac{L \times Tv1 \times \sin(z_7) + Mrez(z) + Md(z) - z_1 \times z_2 \times (mx - my)}{Jw} \\ V(z) \times \cos(z_6 - \beta(z)) \\ V(z) \times \sin(z_6 - \beta(z)) \\ z_3 \\ 0 \end{pmatrix} \quad B(t, z) := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Расчет МКС-управления

$$tf := 1500$$

$$N := 24000$$

$$h := \frac{tf}{N}$$

$$z3_ (t, z) := z_3 + \Phi(t, z)_3 \cdot h$$

$$Tu := 0.1$$

$$z3z (t) := 0.08$$

$$W37(t, z) := \frac{L \cdot Tv1 \cdot \cos(z_7)}{Jw} \cdot h$$

$$G(t, z) := W37(t, z)$$

$$Gplus(t, z) := \frac{1}{G(t, z)}$$

$$u_-(t, z) := Gplus(t, z) \cdot \frac{z_3 z(t) - z_3}{T_u}$$

Начальные условия: Правые части с управлением:

$$z := \begin{pmatrix} 4 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad D(t, z) := \begin{pmatrix} \frac{\cos(z_7) \times (2Tv1) + (-Rx(z) - my \times z_3 \times z_2)}{mx} \\ \frac{L}{2} \times \sin(z_7) \times (2Tv1) + Mrez(z) + Md(z) - z_1 \times z_2 \times (mx - my) \\ Jw \\ V(z) \times \cos(z_6 - \beta(z)) \\ V(z) \times \sin(z_6 - \beta(z)) \\ z_3 \\ u(t, z) \end{pmatrix}$$

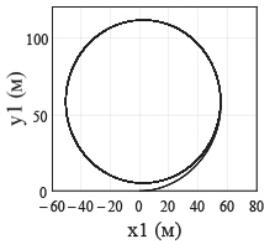
Интегрирование уравнений:

zz := rkfixed(z, 0, tf, N, D)

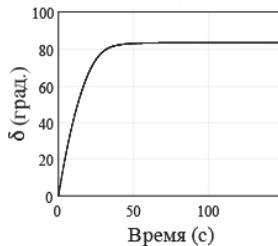
n := 1.. N + 1

Результаты моделирования

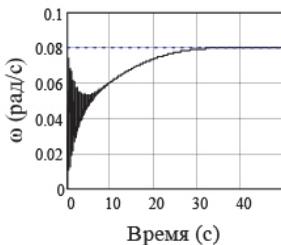
Траектория



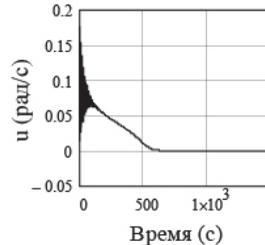
Угол поворота ВРК



Угловая скорость



Управление



В тексте программы представлены результаты моделирования для $z_3^* \equiv z_3 z = 0.08 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ рад. Как видим, данное задающее воздействие точно обрабатывается алгоритмом управления (график w для угловой скорости) при повороте ВРК на угол 85° (график Delta) и обеспечивают диаметр циркуляции порядка 95 м (график Trajectory для траектории).

Выбором z_3^* достигаются разнообразные формы траекторий — от циркуляций с разным радиусом до криволинейных траекторий с разной степенью кривизны. При этом значение $z_3^* = 0,08 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ является близким к предельному. При дальнейшем его увеличении уменьшается диаметр циркуляции, но при этом ухудшается форма процессов, а далее процессы становятся неустойчивыми.

Заметим, что предложенный алгоритм (21) существенно улучшает формы переходных процессов судна по колебательности за счет некоторого уменьшения быстродействия. Для сравнения приведем графики переходных процессов линейных и угловой скорости судна для случая, когда в модель (1), (3), (4) вместо z_7 подается постоянный угол поворота ВРК при $\delta = 0,6 \text{ rad} = 34,4^\circ$. При получении сопоставляемых графиков для алгоритма (21) подобрано значение $z_3^* = 0,00072 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$, когда установившийся угол отклонения руля также $0,6 \text{ rad}$.

Сопоставляя графики рисунков 4 и 5 для начального интервала времени, видим, что переходные процессы по линейным скоростям для предложенного алгоритма не имеют перегулирования.

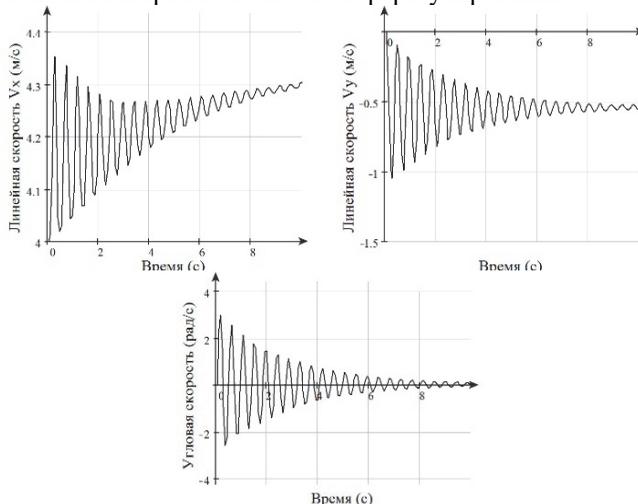


Рис. 4. Переходные процессы при постоянном угле поворота ВРК $0,6 \text{ rad}$ на начальном временном участке

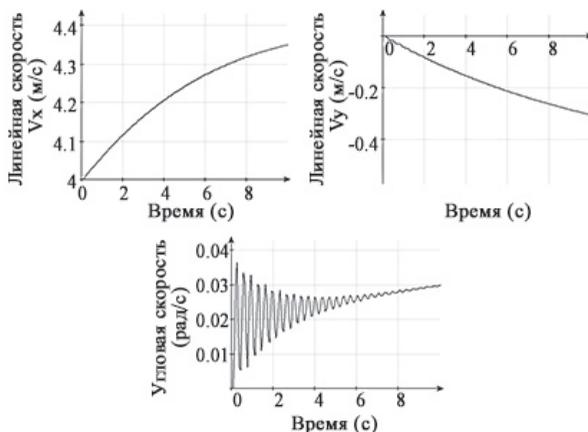


Рис. 5. Переходные процессы при управлении (21) на начальном временном участке

Сильно колебательный процесс имеет место для угловой скорости, однако при исчезающе малых ее значениях (порядка 10^{-4} рад/сек). В то же время при постоянном угле поворота ВРК наблюдаются сильно колебательные процессы, невыносимые для судна и экипажа (угловое ускорение – до $10 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-2}$, линейные ускорения – до $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$). Время регулирования для предлагаемого алгоритма, как видно из графика рисунка 6, составляет величину порядка 50 сек. Для постоянного угла поворота время регулирования — порядка 30 сек (соответствующие графики для длинного временного участка не приводим), но при значительно худшем качестве переходных процессов.

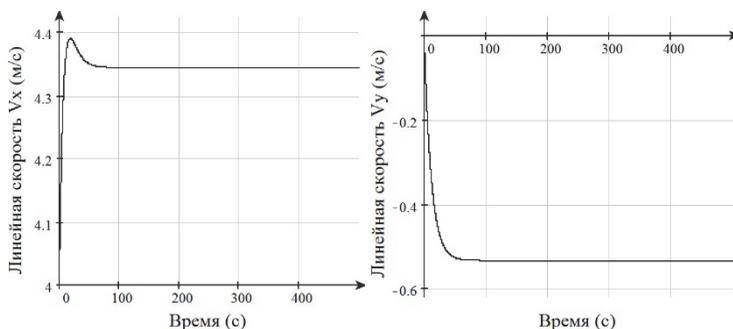


Рис. 6. Переходные процессы при управлении (21) на длинном временном участке

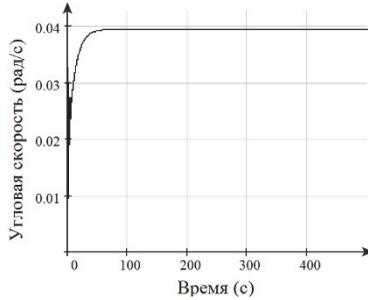


Рис. 6. Переходные процессы при управлении (21) на длинном временном участке

Приведенные выше результаты моделирования получены для постоянных задающих воздействий. Ниже приведены результаты для переменного во времени воздействия $z_3^*(t) = 0.0072 \cdot \sin(8\pi/t_f)$ (рисунок 7).

Как следует из результатов, показанных на графиках рисунка 7, получена извилистая траектория, а зависимости $z_3^*(t)$ (пунктир на третьем графике) и $z_3(t) \equiv \omega(t)$ (сплошная кривая на этом же графике) близки, что свидетельствует о высокой точности решения рассмотренной задачи слежения.

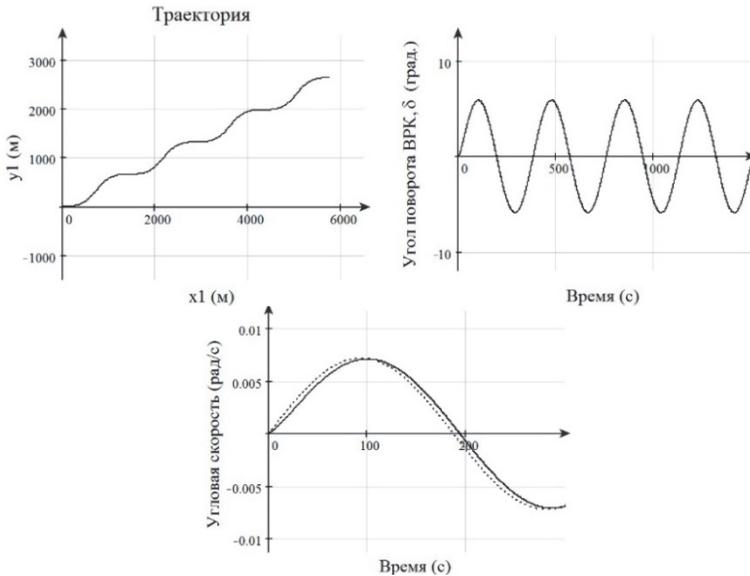


Рис. 7. Траектория и переходные процессы при управлении (21) и задающем воздействии $z_3^*(t) = 0.0072 \cdot \sin(8\pi/t_f)$

Приведем также графики, иллюстрирующие выход судна на заданный курс $K^* \equiv z_6^* = 45,84^\circ = 0,8 \text{ rad}$ при $\omega^* = 0,0022$ посредством алгоритма (17).

Результаты, представленные на графиках рисунка 8, показывают, что цель управления достигнута с очень высокой точностью, не менее трех знаков после запятой.

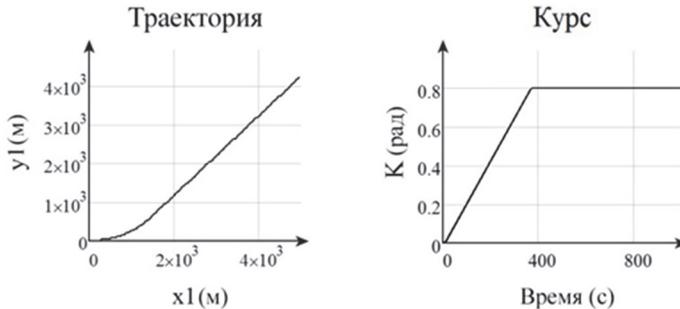


Рис. 8. Траектория и переходный процесс по курсу, полученные в результате применения алгоритма (21) при расчете $z_3^*(t)$ по выражению (17) при

$$K^* \equiv z_6^* = 45,84^\circ = 0,8 \text{ rad}, \quad \omega^* = 0,0022$$

И наконец получим управление при учете динамики приводов ВРК, когда вместо (2) в модели используется уравнение динамики привода в виде инерционного звена первого порядка [1]:

$$\frac{dz_7}{dt} = -\frac{1}{T_\delta} z_7 + \frac{k_\delta}{T_\delta} v \quad (22)$$

с коэффициентом k_δ , постоянной времени T_δ и управляющим воздействием v .

Приравняем правые части (22) управлению u , рассчитываемому по выражениям (20) или (21). В результате получим:

$$-\frac{1}{T_\delta} z_7 + \frac{k_\delta}{T_\delta} v = u,$$

откуда следует:

$$v = \frac{1}{k_\delta} z_7 + \frac{T_\delta}{k_\delta} u. \quad (23)$$

Управление (23), где вместо u подставляются выражения (20) или (21) в зависимости от того, первоначальное или упрощенное управления используются, приведет к заданному углу поворота ВРК, но уже при учете динамики привода.

5. Заключение. В результате исследований получены способы управления угловой скоростью и курсом судна-катамарана на основе применения терминального метода конечного состояния для нелинейных систем, адаптированного для задач стабилизации и слежения. Основной способ предназначен для отслеживания постоянного или переменного во времени задающего воздействия для угловой скорости. Получен алгоритм для вычисления задающего значения угловой скорости судна, обеспечивающего выход судна за заданное время на заданный курс. На основе сформированной аналитической нелинейной модели судна катамаранного типа с двумя винторулевыми колонками, учитывающей его массогабаритные и тяговые характеристики, разработаны первоначальный (20) и упрощенный (21) способы управления угловой скоростью судна при «сильных» маневрах с использованием метода конечных состояний. Под «сильными» маневрами в судовождении понимаются маневры с большими углами перекладки рулей, когда линеаризованные модели судов неприменимы. Разработанные способы управления имеют вид простых структур, явно зависящих от задающего воздействия, длины судна, упоров винторулевых колонок, момента инерции, а также известных нелинейных функций текущего состояния — скоростей по продольной и поперечной осям судна, угловой скорости и угла поворота винторулевых колонок. В упрощенном способе измерения скоростей не используются. Моделирование управляемой системы предложенными способами посредством MathCAD, текст программы которой приложен, подтверждают работоспособность и особенности первоначального (20) и упрощенного (21) способов управления при постоянных и переменных во времени задающих воздействиях по угловой скорости. Показана возможность использования указанных способов для вывода судна с высокой точностью на заданный курс посредством алгоритма (17), а также возможность учета динамики приводов ВРК с помощью преобразования (23) управлений (20) или (21). Для учета ветро-волновых воздействий можно воспользоваться соответствующими моделями, например, из [24].

Литература

1. Вагущенко Л.Л., Цымбал Н.Н. Системы автоматического управления движением судна // М.: ТрансЛит, 2007. 376 с.
2. Шушляпин Е.А., Карапетян В.А., Афонина А.А., Филлер И.Ю. Задачи безэкипажного судноходства и математическая модель научно-исследовательского судна «Пионер-М» // Робототехника и искусственный интеллект – 2016: Материалы

- ВИИИ Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. Красноярск: БИК СФУ. 2016. С. 117–122.
3. *Nariprasad S.A. et al.* A Design Approach to Rudder Controller // *International Journal of Computer Science*. 2012. vol. 3. Issue 3. pp. 23–29.
 4. *Дорри М.Х., Острецов Г.Э., Роцин А.А.* Способ управления движением судна по заданной траектории // Патент РФ. № 2465169. 2012. 9 с.
 5. *Острецов Г.Э., Клячко Л.М., Памухин С.Г.* Способ управления движением судна по заданной траектории // Патент РФ. № 2483973. 2013. 7 с.
 6. *Aguilar A.P., Pascoal A.M.* Dynamic positioning and way-point tracking of underactuated AUVs in the presence of ocean currents // *International Journal of Control*. 2007. vol. 80. no. 7. pp. 1092–1108.
 7. *Zhao Y., Huang H., Zhuang Y.* The Heading Control of POD-Driven Ship Using Adaptive Integrator Backstepping // *Proceedings of the 5th International Conference on Electrical Engineering and Automatic Control*. 2016. pp. 173–179.
 8. *Корицов А.М.* Интеллектуальное управление в технических системах // *Научный вестник НГТУ*. 2014. № 154). С. 18–26.
 9. *Witkowska A., Smierzchalski R.* Designing a ship course controller by applying the adaptive backstepping method // *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*. 2012. vol. 22. no. 4. pp. 985–997.
 10. *Sutulo S., Moreira L., Soares C.G.* Mathematical models for ship path prediction in manoeuvring simulation systems // *Ocean engineering*. 2002. vol. 29. no. 1. pp. 1–19.
 11. *Yoshimura Y.* Mathematical model for manoeuvring ship motion (MMG Model) // *Workshop on Mathematical Models for Operations involving Ship-Ship Interaction*. 2005. pp. 1–6.
 12. *Ashrafiuon H., Muske K. R., McNinch L. C., Soltan R. A.* Sliding Mode Tracking Control of Surface Vessels // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2008. vol. 55. no. 11. pp. 4004–4012.
 13. *Isidori A.* *Nonlinear Control Systems: 3rd Ed* // N.Y.: Springer Verlag, 1995. 485 p.
 14. *Wu W.* Lyapunov-Based Design Procedures for a State-Delay Chemical Process // *14th World Congress of IFAC*. 1999. vol. N. pp. 127–132.
 15. *Батенко А.П.* Системы терминального управления // М.: Радио и связь. 1984. 160 с.
 16. *Шушлятин Е.А.* Управление нелинейными системами на основе прогноза конечного состояния неуправляемого движения // Севастополь: СевНТУ. 2012. 282 с.
 17. *Методы классической и современной теории автоматического управления: учебник в 5-ти тт. Т.5: Методы современной теории автоматического управления / Под ред. К.А. Пупкова, Н.Д. Егупова // М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2004. 784 с.*
 18. *Xu T., Liu X., Yang X.* A novel approach for ship trajectory online prediction using BP neural network algorithm // *Advances in information Sciences and Service Sciences (AISS)*. 2012. vol. 4. no. 11. pp. 271–277.
 19. *Седова Н.А.* Формирование лингвистических переменных для задач судовождения // *Эксплуатация морского транспорта*. 2013. № 2(72). С. 19–23.
 20. *Шушлятин Е.А., Безуглая А.Е., Афонина А.А.* Управление мобильным роботом «ArctobotsSparki» методом конечного состояния // *Системы контроля окружающей среды*. 2016. Вып. 5(25). С.34–40.
 21. *Афонина А.А., Безуглая А.Е., Шушлятин Е.А., Подольская О.Г.* Управление двухколесным роботом дискретным методом конечного состояния // *Наука и мир*. 2016. № 4(32). С. 28–36.
 22. *Справочник по теории корабля: В трех томах. Том 3. Управляемость водоизмещающих судов. Гидродинамика судов с динамическими принципами поддержания / Под ред. Я.И. Войткунского // Л.: Судостроение. 1985. 544 с.*

23. *Алексеев В.М.* Об одной оценке возмущений обыкновенных дифференциальных уравнений // Вестн. Москов. ун-та. Сер.1. Математика, механика. 1961. № 2. С. 28–36.
24. *Zan Y. et al.* Research on Real-Time Simulation System of Ship Motion Based on Simulink // Open Mechanical Engineering Journal. 2014. vol. 8. pp. 820–827.

Шушляпин Евгений Андреевич — д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры информатики и управления в технических системах института информационных технологий и управления в технических системах, ФГАОУ ВО "Севастопольский государственный университет". Область научных интересов: управление нелинейными системами. Число научных публикаций — 127. bu6@bk.ru; ул. Университетская, 33, Севастополь, 299053; р.т.: +7(8692)435-130.

Карапетьян Валерий Артёмович — к-т техн. наук, доцент, доцент кафедры информатики и управления в технических системах института информационных технологий и управления в технических системах, ФГАОУ ВО "Севастопольский государственный университет". Область научных интересов: анализ и синтез систем автоматического управления. Число научных публикаций — 42. karvalart@mail.ru; ул. Университетская, 33, Севастополь, 299053; р.т.: +7(8692)435-130.

Безуглая Анна Евгеньевна — к-т техн. наук, доцент кафедры информационных систем института информационных технологий и управления в технических системах, ФГАОУ ВО "Севастопольский государственный университет". Область научных интересов: робототехника, управление нелинейными системами. Число научных публикаций — 24. anna_bezuglaya@list.ru; ул. Университетская, 33, Севастополь, 299053; р.т.: +7(8692)435-130.

Афонина Анастасия Александровна — аспирант кафедры информатики и управления в технических системах института информационных технологий и управления в технических системах, ФГАОУ ВО "Севастопольский государственный университет". Область научных интересов: управление нелинейными системами. Число научных публикаций — 4. a.afonina@ubk.su; ул. Университетская, 33, Севастополь, 299053; р.т.: +7(8692)435-130.

Поддержка исследований. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках базовой части государственного задания в сфере научной деятельности (проекты № АААА-А16-116081910041-0 и № 2.8629.2017/БЧ).

E.A. SHUSHLYAPIN, V.A. KARAPETYAN, A.E. Bezuglaya, A.A. Afonina
**NONLINEAR REGULATORS FOR DEDUCTION OF THE VESSEL
 ON THE SET TRAJECTORY AT "STRONG" MANEUVERS**

Shushlyapin E.A., Karapetyan V.A., Bezuglaya A.E., Afonina A.A. Nonlinear Regulators for Deduction of the Vessel on the Set Trajectory at "Strong" Maneuvers.

Abstract. Researches are part of works on creation of the small size robotic research vessel for complex environmental monitoring of the sea coastal water area of the Black Sea, and also lakes and the rivers, with basing in Sevastopol. On the basis of the created analytical nonlinear model of the vessel of catamaran type with two rudder propellers, considering its mass-dimensional and traction characteristics, the initial and simplified ways of management of angular speed and ship's heading at "strong" maneuvers with the use of the method of final states are developed. "Strong" maneuvers in navigation are understood as maneuvers with big corners of turn of wheels when the linearized models of vessels are inapplicable. The developed ways of management have appearance of the simple structures which obviously depend on the setting influence, length of the vessel, emphasis of rudder propellers, vessel moment of inertia, and also the known nonlinear functions of current status — speeds on longitudinal and cross axes of the vessel, angular speed and turning angle of rudder propellers. In the simplified way values of measurements of speeds are not used.

Keywords: nonlinear systems, catamaran, deduction of the vessel on trajectories, management of angular speed, steering, method of final state, strong maneuvers.

Shushlyapin Evgeny Andreevich — Ph.D., Dr. Sci., professor, professor of informatics and control in technical systems department in Institute of information technologies and control in technical systems, Sevastopol State University. Research interests: control of nonlinear systems. The number of publications — 127. 6u6@bk.ru; 33, St. Universitetskaya, Sevastopol, 299053, Russia; office phone: +7(8692)435-130.

Karapetyan Valery Artyomovich — Ph.D., associate professor, associate professor of informatics and control in technical systems department in Institute of information technologies and control in technical systems, Sevastopol State University. Research interests: analysis and synthesis of linear control systems. The number of publications — 42. karvalart@mail.ru; 33, St. Universitetskaya, Sevastopol, 299053, Russia; office phone: +7(8692)435-130.

Bezuglaya Anna Evgenyevna — Ph.D., associate professor, associate professor of information systems department in Institute of information technologies and control in technical systems, Sevastopol State University. Research interests: control of nonlinear systems, robotics. The number of publications — 24. anna_bezuglaya@list.ru; 33, St. Universitetskaya, Sevastopol, 299053, Russia; office phone: +7(8692)435-130.

Afonina Anastasia Aleksandrovna — Ph.D. student of informatics and control in technical systems department in Institute of information technologies and control in technical systems, Sevastopol State University. Research interests: control of nonlinear systems. The number of publications — 4. a.afonina@ubk.su; 33, St. Universitetskaya, Sevastopol, 299053, Russia; office phone: +7(8692)435-130.

Acknowledgements. The research is supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation in the framework of the basic part of the state order (projects № AAAA-A16-116081910041-0 and № 2.8629.2017/БЧ).

References

1. Vagushchenko L.L., Tsymbal N.N. *Sistemy avtomaticheskogo upravleniya dvizheniem sudna* [System of automatic control of ship motion]. M.: TransLit. 2007. 376 p. (In Russ.).
2. Shushlyapin E.A., Karapet'yan V.A., Afonina A.A., Filler I.Y. [The problem of unmanned navigation and the mathematical model of the research vessel "Pioneer-M"]. *Robototekhnika i iskusstvennyj intellekt – 2016: Materialy VIII Vserossijskoj nauchno-tekhnichejskoj konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Robotics and artificial intelligence – 2016: materials of the VIII all-Russian scientific-technical conference with international participation]. Krasnoyarsk: BIK SFU. 2016. pp. 117–122. (In Russ.).
3. Hariprasad S.A. et al. A Design Approach to Rudder Controller. *International Journal of Computer Science*. 2012. vol. 3. Issue 3. pp. 23–29.
4. Dorri M.H., Ostretsov G.E., Roshchin A.A. *Sposob avtomaticheskogo upravleniya dvizheniem sudna* [Method of automatic control of ship motion]. Patent RF. no. 2465169. 2012. 9 p. (In Russ.).
5. Ostretsov G.E., Klyachko L.M., Pamuhin S.G. *Sposob upravleniya dvizheniem sudna po zadannoj traektorii* [A method of controlling movement of a vessel along a predetermined path]. Patent RF. no. 2483973. 2013. 7 p. (In Russ.).
6. Aguiar A.P., Pascoal A.M. Dynamic positioning and way-point tracking of underactuated AUVs in the presence of ocean currents. *International Journal of Control*. 2007. vol. 80. no. 7. pp. 1092–1108.
7. Zhao Y., Huang H., Zhuang Y. The Heading Control of POD-Driven Ship Using Adaptive Integrator Backstepping. Proceedings of the 5th International Conference on Electrical Engineering and Automatic Control. 2016. pp. 173–179.
8. Korikov A.M. [Intelligent control in technical systems]. *Nauchnyj vestnik NGTU – Science bulletin of NSTU*. 2014. vol. 1(54). pp. 18–26. (In Russ.).
9. Witkowska A., Smierczalski R. Designing a ship course controller by applying the adaptive backstepping method. *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*. 2012. vol. 22. no. 4. pp. 985–997.
10. Sutulo S., Moreira L., Soares C.G. Mathematical models for ship path prediction in manoeuvring simulation systems. *Ocean engineering*. 2002. vol. 29. no. 1. pp. 1–19.
11. Yoshimura Y. Mathematical model for manoeuvring ship motion (MMG Model). Workshop on Mathematical Models for Operations involving Ship-Ship Interaction. 2005. pp. 1–6.
12. Ashrafiuon H., Muske K.R., McNinch L.C., Soltan R.A. Sliding Mode Tracking Control of Surface Vessels. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2008. vol. 55. no. 11. pp. 4004–4012.
13. Isidori A. *Nonlinear Control Systems: 3rd Ed.* N.Y.: Springer Verlag, 1995. 485 p.
14. Wu W. Lyapunov-Based Design Procedures for a State-Delay Chemical Process. 14th World Congress of IFAC. 1999. vol. N. pp. 127–132.
15. Batenko A.P. *Sistemy terminalnogo upravleniya*. [System terminal control]. M.: Radio i svyaz. 1984. 160 p. (In Russ.).
16. Shushlyapin E.A. *Upravlenie nelinejnymi sistemami na osnove prognoza konechnogo sostoyaniya neupravlyаемого dvizheniya*. [Control of nonlinear systems based on the forecast end-state unmanaged traffic]. Sevastopol: SevNTU. 2012. 282 p. (In Russ.).
17. *Metody klassicheskoj i sovremennoj teorii avtomaticheskogo upravleniya: Uchebnik v 5-ti tt. T.5: Metody sovremennoj teorii avtomaticheskogo upravleniya. Pod red. K.A. Pupkova, N.D. Egupova* [Methods of classical and modern automatic control theory: Textbook in 5

- vols.; vol. 5: Methods of modern theory of automatic control. Edited by K.A. Pupkova, N.D. Egupova]. M.: Izdatelstvo MGTU im. N.EH. Baumana. 2004. 784 p. (In Russ.).
18. Xu T., Liu X., Yang X. A novel approach for ship trajectory online prediction using BP neural network algorithm. *Advances in information Sciences and Service Sciences (AISS)*. 2012. vol. 4. no. 11. pp. 271–277.
 19. Sedova N.A. [The formation of linguistic variables for task navigation]. *Jekspluatacija morskogo transporta – Operation of Maritime transport*. 2013. No. 2(72).p.19-23. (In Russ.).
 20. Shushlyapin E.A., Bezuglaya A.E., Afonina A.A. *Upravlenie mobilnym robotom «ArcboticsSparki» metodom konechnogo sostoyaniya*. [Mobile Robot Control «ArcboticsSparki» by the final state metod]. *Sistemy kontrolya okruzhayushchej sredy – Environmental monitoring systems*. 2016. vol. 5(25). pp. 34–40. (In Russ.).
 21. Afonina A.A., Bezuglaya A.E., Shushlyapin E.A., Podolskaya O.G. [Control two-wheeled robot discrete finite state metod]. *Nauka i mir – Science and world*. 2016. vol. 4(32). pp. 28–36. (In Russ.).
 22. *Spravochnik po teorii korablya: V trekh tomah. Tom 3. Upravlyаемost vodoizmeshchayushchih sudov. Gidrodinamika sudov s dinamicheskimi principami podderzhaniya. Pod red. Ja.I. Vojtkunskogo* [Handbook of ship theory: In three volumes. Volume 3. The controllability of the displacement vessels. Hydrodynamics of vessels with dynamic principles of maintenance. Edited by Y.I. Vojtkunskogo]. L.: Sudostroenie, 1985. 544 p. (In Russ.).
 23. Alekseev V.M. *Ob odnoj ocenke vozmushchenij obyknovennykh differentsialnykh uravnenij* [On one estimate perturbations of ordinary differential equations]. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya 1. Matematika. Mekhanika*. 1961. vol. 2. pp. 28–36. (In Russ.).
 24. Zan Y. et al. Research on Real-Time Simulation System of Ship Motion Based on Simulink. *Open Mechanical Engineering Journal*. 2014. vol. 8. pp. 820–827.

К.А. КУЛАКОВ, Ю.В. ЗАВЬЯЛОВА, И.М. ШАБАЛИНА
**СОЦИАЛЬНЫЙ НАВИГАТОР: РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОГРАММНОЙ
ИНФРАСТРУКТУРЫ ПЛАНИРОВАНИЯ МАРШРУТОВ ДЛЯ
ЛЮДЕЙ С ОГРАНИЧЕННЫМИ ВОЗМОЖНОСТЯМИ**

Кулаков К.А., Завьялова Ю.В., Шабалина И.М. Социальный навигатор: реализация программной инфраструктуры планирования маршрутов для людей с ограниченными возможностями.

Аннотация. Важной задачей современного общества является обеспечение людей с ограниченными возможностями всеми правами, в частности, правами на свободное передвижение. В статье представлена реализация проекта «Социальный навигатор» нацеленного на создание информационной инфраструктуры для поддержки людей с ограниченными возможностями при самостоятельном передвижении по населенному пункту. В проекте реализованы технологии, расширяющие возможности современных программных инструментов построения маршрутов. Рассмотрены способы организации и использования данных об имеющихся дорожных препятствиях, о доступности объектов социальной значимости. Особое внимание уделяется оценке сложности препятствий в зависимости от видов ограничений возможностей пользователей и влиянию препятствий на доступность маршрута. В рамках проекта реализована задача построения маршрута с учетом типа дорог и наличия препятствий, а также проведена адаптация информации стандартных картографических сервисов к использованию для построения пешеходных маршрутов для людей с ограничениями. Программная инфраструктура включает в себя сервисы для сбора препятствий и их экспертной оценки, картографический сервис для генерации графа дорог, сервис для сбора данных о доступности социальных объектов, приложение, позволяющее строить маршруты и осуществлять навигацию используя мобильное устройство. Для конечных пользователей доступны web и мобильные версии реализованных сервисов. Предложенная инфраструктура повышает качество жизни людей с ограниченными возможностями за счет организации их личной мобильности, упрощения доступа к социальным услугам и сервисам, полноценного вовлечения в жизнь местного сообщества.

Ключевые слова: доступная среда, маршрутизация, мобильность, социальный навигатор, паспорт доступности.

1. Введение. Одной из важных задач современного общества является обеспечение людей с ограниченными возможностями всеми правами, в частности — правами на свободное передвижение. Согласно статье 19 конвенции ООН [1] государства-участники принимают эффективные и надлежащие меры для обеспечения самостоятельного образа жизни и вовлеченности в местное сообщество людей с ограниченными физическими возможностями.

К сожалению, лишь недавно тема создания безбарьерной среды получила особую приоритетность [2, 3]. Недоступность объектов коллективного доступа повышает личную социальную изоляцию такого человека и исключение из жизни общества. Кроме того, проблема передвижения людей с ограниченными физическими возможностями из-

за возникающих дорожных препятствий, например, лестниц и бордюров, не позволяет воспользоваться имеющейся инфраструктурой без помощи посторонних лиц.

Существующие подходы к обеспечению доступности объектов коллективного доступа, как правило, используются на месте существующей проблемы и не обеспечивают информирование на расстоянии. Одним из способов обеспечения передачи информации о существующих проблемах и/или возможностях является использование информационных и коммуникационных технологий. Например, в рамках государственной программы «Доступная среда» [4] выполняется формирование паспортов доступности социальных объектов в регионах Российской Федерации. В республике Карелия Министерством здравоохранения и социального развития разработан и введен в эксплуатацию сервис «Паспорт Доступности» [5]. Сервис предназначен для сбора данных о доступности социально значимых объектов, оценка доступности осуществляется специалистами министерства. Однако, использование сервиса обычным пользователями затруднено в связи с большим объемом технической информации.

В рамках решения проблемы предложен проект «Социальный навигатор», предназначенный для сбора информации о доступности социально значимых объектов и повышения мобильности людей с ограниченными физическими возможностями за счет информированности о доступности маршрутов передвижения к объектам. Проект является ключевым элементом развития информационной среды, поскольку он объединяет собранную информацию о доступности инфраструктуры и объектов и предоставляет функциональные возможности для онлайн-поддержки людей с ограниченными возможностями.

В статье представлена реализация проекта «Социальный навигатор». Рассмотрены способ организации сбора и использования данных об имеющихся дорожных препятствиях, способ организации сбора и использования данных о доступности объектов коллективного доступа, задача построения пешеходного маршрута с учетом ограничений, сценарии использования сервиса планирования маршрутов и описание программных реализаций.

2. Обзор смежных работ. Задача построения маршрутов для пешеходов является актуальной, несмотря на значительное количество реализованных сервисов [6]. При этом существующие проекты по обеспечению мобильности людей с ограниченными возможностями, как правило, ориентированы на людей, передвигающихся в инвалидных колясках. В частности, в открытом картографическом проекте OpenStreetMap существует возможность добавления информации о

доступности объектов инфраструктуры для людей, передвигающихся в инвалидных колясках [7].

В работах [8-10] представлены адаптивные системы для навигации людей, передвигающихся в инвалидных колясках. Производится анализ дорожной сети, поиск наличия препятствий, влияющих на передвижение.

В работах [11, 12] рассмотрены навигационные системы для людей, передвигающихся в инвалидных колясках с использованием компьютерного зрения. Представленные системы позволяют предупредить о возникновении дорожного препятствия на пути следования.

Также существует ряд работ, посвященных сопровождению людей с нарушениями зрения. Например, в работах [13, 14] показана возможность построения маршрутов и сопровождения людей с нарушениями зрения с использованием мобильных устройств. В работе [15] представлена объектно-ориентированная модель данных для построения маршрутов между объектами массового доступа с учетом препятствий. В проекте «Говорящий город» (<http://www.speakingcity.org>) с помощью мобильного устройства-приемника и множества стационарных устройств-передатчиков выполняется ориентирование людей с нарушениями зрения.

Другой способ получения информации о доступности инфраструктуры использует анализ движения людей с ограниченными возможностями. В работе [16] представлена система для анализа движения пешехода на основе сбора информации о перемещении мобильного телефона. Анализ шаблона движения позволяет определить безбарьерные участки, где скорость передвижения пешехода максимальна, и труднопроходимые участки, где скорость передвижения минимальна.

Одним из популярных направлений разрешения проблемы барьеров на пути следования людей с ограниченными возможностями является устранение препятствий внутри помещений. Министерством регионального развития РФ подготовлен свод правил СНиП 35-01-2001 [17] «Доступность зданий и сооружений для маломобильных групп населения». В письме Министерства здравоохранения и социального развития РФ [18] представлены рекомендации по анализу зданий, разработке рекомендаций и обеспечению доступности. В работе [19] описано решение проблемы организации доступной среды с помощью визуальной (навигационной) информационной системы. В работе [8] показана возможность использования открытых данных (OpenStreetMap) для прохождения прилегающей территории.

Для решения задачи построения маршрутов, как правило, используется либо готовый геоинформационный сервис с функцией навигации,

либо отдельное программное средство или библиотека совместно с загружаемым графом дорог. Программное обеспечение для построения маршрутов на базе карт OpenStreetMap позволяет строить маршруты как в веб-приложениях, так и в мобильных устройствах или портативных компьютерах. Существует большое количество библиотек на различных языках программирования для построения маршрутов с использованием данных OpenStreetMap. В частности, GraphHopper Directions API (<https://github.com/graphhopper/graphhopper>) имеет версию с открытым исходным кодом и реализован для различных операционных систем.

В тоже время использование данных OpenStreetMap для построения пешеходных маршрутов требует предварительной подготовки. В работах [20, 21] представлены способы подготовки исходных данных OpenStreetMap для людей с ограниченными возможностями.

В работе [22] рассмотрена система для построения персонализированной карты доступности. Система PAM-Pitt выполняет построение как кратчайшего маршрута между двумя точками, так и более безопасного в соответствии с заданными видами ограничений.

Задача сбора информации о препятствиях также является актуальной. В работе [23] рассмотрена система для сбора информации о препятствиях и уведомления пользователя при его приближении к препятствию. В работе [24] представлено приложение для сбора информации о препятствиях с предложениями по улучшению качества собираемых данных.

3. Сбор дорожных препятствий. Основное различие между обычными пешеходами и людьми с ограниченными возможностями заключается в необходимости определения дорожных препятствий и сложности их преодоления при перемещении. Например, на перекрестке тротуар отделяется от проезжей части бордюром, не вызывающим трудности в преодолении обычным пешеходом. Однако, для людей, передвигающихся на инвалидных колясках, высокий бордюр может стать серьезной проблемой, требующей привлечения посторонней помощи или изменения маршрута движения. Разработанное в рамках проекта приложение для мобильного устройства предоставляет звуковую или визуальную инструкцию, что может позволить передвигаться человеку без помощи посторонних лиц.

Определение дорожных препятствий зависит от видов ограничений возможностей человека. Для проекта «Социальный навигатор»

были выбраны пять групп ограничений возможностей, которые представлены в таблице 1.

Таблица 1. Категории ограничений возможностей

Категория	Особенности	Ограничения
(А) Лица, передвигающиеся на инвалидных колясках	Перепады высот, наклонные поверхности, узкие проходы	Ограничения способности к самостоятельному передвижению
(В) Лица с нарушением слуха	Звуковые сигналы, интенсивный трафик	Ограничение способности к общению, восприятию звуковой информации
(С) Лица с нарушением зрения	Знаки, визуальные сигналы, выступы	Ограничение способности к самостоятельному передвижению; Ограничение способности к ориентации
(D) Лица с нарушением опорно-двигательного аппарата	Перепады высот, наклонные поверхности, узкие проходы	Ограничения способности к самостоятельному передвижению
(Е) Люди с нарушением умственного развития	Восприятие знаков, сигналов, интенсивного трафика	Ограничение способности к общению; Ограничение способности к ориентации

В результате анализа ограничений возможностей и обследования городских территорий был сформирован список дорожных препятствий, представленный в таблице 2. Список дорожных препятствий может быть расширен при необходимости. В текущей реализации в список не включены временные препятствия, например, дорожные работы, лужи или гололед, так как для их учета требуется использование других источников данных (например, количество выпавших осадков в районе лужи, скорость стока воды в ливневую канализацию, солнечная активность, влажность воздуха и так далее) и отслеживание их актуальности.

Сложность прохождения препятствия оценивается на основе геометрических размеров и других технических параметров [17]. Для упрощения классификации используется пятибалльная шкала уровней сложности препятствия с шагом 0,5. Например, если на дороге присутствует бордюрный камень с пандусом для съезда и высота пандуса меньше 1,5 см, то перемещение людей с ограниченными физическими возможностями не будет вызывать затруднений (сложность 0; 0,5 или 1 в зависимости от других параметров). Однако о наличии такого

препятствия на маршруте следования следует информировать людей с нарушениями зрения.

Для оценки степени влияния препятствия на ограничение возможности используется таблица смежности с коэффициентами, представленными в таблице 3. Если препятствие несколько не затрудняет движение лица с ограниченными возможностями, то коэффициент сложности равен нулю (или «-»). В противном случае представлены 5 коэффициентов сложности.

Таблица 2. Категории дорожных препятствий

Название	Описание
(1) Бордюр	Отделение края пешеходной зоны от проезжей части, газонов и зеленых насаждений
(2) Нерегулируемый пешеходный переход	Пересечение пешеходной и проезжей частей, обозначенное соответствующими дорожными знаками с наличием пандуса или без него
(3) Регулируемый пешеходный переход	Пересечение пешеходной и проезжей частей с использованием светофора или другого способа регулирования движения
(4) Лестница без пандуса	Железобетонная, деревянная или металлическая конструкция со ступенями и поручнем для преодоления уклона местности
(5) Лестница с пандусом	Железобетонная, деревянная или металлическая конструкция со ступенями, поручнем и наклонной площадкой, соединяющая две горизонтальные плоскости, расположенные на разной высоте по отношению друг к другу, для преодоления уклона местности
(6) Неровная дорога	Яма или локальная неровность на дорогах, в том числе дороги без покрытия
(7) Уклон	Крутой подъем или спуск
(8) Сужение дороги	Сужение пешеходной части дороги за счет выступающих объектов
(9) Объект на дороге	Прочие объекты на дороге, например, столбы освещения, рекламные стенды
(10) Ворота	Ворота, шлагбаумы, турникеты и прочие механизмы для ограничения доступа
(11) Остановка	Остановочные комплексы для общественного/маршрутного транспорта или такси с платформой, навесом и/или указателями

1 — самостоятельное перемещение, беспрепятственное прохождение участка дороги, к которому привязано препятствие;

2 — самостоятельное перемещение затруднено, препятствие требует повышенного внимания, затрудняет движение;

3 — самостоятельное перемещение требует подготовки, препятствие сильно затрудняет перемещение;

4 — перемещение только при наличии помощи, для человека с ограничениями без сопровождающего участок дороги с препятствием вызовет сильные затруднения;

5 — непреодолимое препятствие, человек с ограничениями не может использовать данный участок пути при передвижении.

Таблица 3. Коэффициенты сложности прохождения препятствия

Препятствие	(A)	(B)	(C)	(D)	(E)
(1)	1,2,3,4,5	—	1,1,2,3,4	1,1,2,3,4	—
(2)	1,2,3,4,5	—	1,1,2,2,3	1,1,2,2,3	—
(3)	—	1,2,3,4,5	1,2,3,4,5	—	1,2,3,4,5
(4)	1,2,3,4,5	—	1,1,2,3,4	1,1,2,3,4	—
(5)	1,2,3,4,5	—	—	1,2,3,4,5	—
(6)	—	1,2,3,4,5	1,2,3,4,5	—	1,2,3,4,5
(7)	1,2,3,4,5	—	—	1,1,2,2,3	—
(8)	—	—	1,2,3,4,5	—	—
(9)	1,2,3,4,5	—	1,2,3,4,5	—	—
(10)	1,2,3,4,5	—	1,2,3,4,5	1,2,3,4,5	1,1,2,2,3
(11)	1,2,3,4,5	—	1,1,2,2,3	1,1,2,2,3	—

Для каждого уровня сложности препятствий определены коэффициенты сложности для каждой категории ограничений возможностей. Например, если волонтер обнаружил крутой склон дороги и отметил его уровнем сложности 3 (в соответствии с техническими характеристиками препятствия), то для колясочников для такого препятствия используется коэффициент сложности, равный 3, для лиц с нарушением опорно-двигательного аппарата коэффициент будет равен 2, а для людей с нарушением слуха коэффициент сложности равен нулю. Порядок коэффициентов в списке соответствует уровням сложности по возрастанию.

В проекте «Социальный навигатор» информация о препятствиях размещается на геоинформационном сервере GeTS (<http://gets.cs.petrso.ru/obstacle/service>) разработанном на основе технологии Geo2tag [25]. Сервер GeTS обеспечивает доступ к сбору и управлению данными о дорожных препятствиях с помощью стороннего программного обеспечения через программный интерфейс (API) и веб-интерфейс. Пользователи сервера классифицируются в соответствии с уровнем доступа и возможностями: гости, авторизованные пользователи, доверенные пользователи и администраторы. Все авторизованные пользователи могут управлять информацией в предоставляемом сервером личном пространстве. Доверенные пользователи и

администраторы также имеют право на публикацию и управление информацией в общем открытом пространстве. Открытое пространство доступно для чтения всем категориям пользователей сервера GeTS.

Веб-интерфейс (<http://gets.cs.petsru.ru/obstacle/web-client>) включает в себя карту для отображения точек, список ближайших объектов и набор вкладок с точками, соответствующими препятствиям, социальным объектам и административным функциям. Фрагмент формы редактирования точки препятствия показан на рисунке 1. Пользователь может редактировать общие поля, такие как имя точки, координаты и описание, добавлять фотографию подтверждения и добавлять/редактировать дополнительные поля. Кроме того, веб-интерфейс обеспечивает более точное позиционирование, и пользователь может при необходимости уточнить координаты точки.

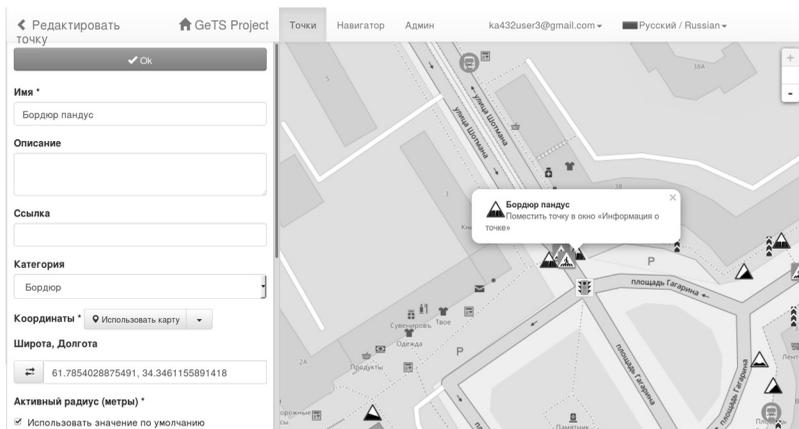


Рис. 1. Фрагмент формы GeTS для редактирования точки

Приложение для мобильных устройств GeTS предоставляет возможность добавлять и редактировать препятствия на карте, публиковать их в открытом пространстве. Это приложение позволяет упростить ручной ввод, осуществлять сбор данных «на местности», определять местоположение пользователя. Приложение отображает окно с картой, на которой пользователь указывает точку и набор параметров. Пользователь вводит название препятствия, затем выбирает категорию и ставит уровень сложности препятствия по пятибалльной шкале. Веб-интерфейс является аналогом приложения для редактирования мобильных препятствий.

Существует несколько способов сбора информации о препятствиях.

– Автоматический импорт известных препятствий от стороннего источника. Этот способ применяется для некоторых типов препятствий, например, перекрестков. Полученные данные должны быть проверены и оценены экспертом. В качестве стороннего источника в проекте «Социальный навигатор» используется база данных свободно-картографического сервиса OpenStreetMap (<http://openstreetmap.org>).

– Ручной ввод препятствий. Ручной ввод может быть выполнен через веб-интерфейс GeTS. Это достаточно медленный, но надежный способ, ориентированный на хорошую память эксперта и/или предварительный сбор данных.

– Использование мобильного приложения GeTS supplement для ввода препятствий. Приложение доступно в магазине Android Google Play для бесплатной загрузки (<https://play.google.com/store/apps/details?id=org.fruct.oss.getssupplement>).

Согласно результатам исследования пилотного района, предпочтительным является объединение способов в следующей последовательности:

1. Автоматический импорт известных препятствий из OpenStreetMap, получение данных о лестницах, пешеходных переходах и светофорах.

2. Составление плана обследования территории волонтерами с указанием списка улиц.

3. Обследование территории для обнаружения дорожных препятствий. Информация о найденном дорожном препятствии вводится с помощью приложения GeTS supplement и включает рейтинг, комментарии волонтера, фотографии и аудио с пояснениями при необходимости.

4. Ручная коррекция собранных препятствий с использованием веб-интерфейса GeTS: уточнение местоположения дорожных препятствий, связывание с пешеходными дорогами, коррекция рейтинга и комментария.

Использование собранных данных о дорожных препятствиях в алгоритме маршрутизации требует привязки точек к участкам пешеходных дорог. При использовании автоматического определения местоположения в приложении GeTS supplement, присутствует погрешность в определении местоположения с помощью gps-модуля мобильного устройства. Также пользователь может некорректно задать точку, например, в стороне от дороги. Для решения этой проблемы приложение GeTS supplement включает функцию «магнит», которая перемещает новую точку к ближайшей линии дороги. Эта функция требует наличия графа дорог в мобильном приложении. Пользователь может включить или отключить «магнит» в зависимости от ситуации в соответствии с рисунком 2. С помощью функции «магнит» получаются

более точные координаты точки и можно явно определить, на каком участке дороги расположено препятствие. Данная функция необходима при нанесении препятствий близко к пересечениям дорог — без привязки к конкретному участку препятствие может влиять на маршрут, который не проходит через данное препятствие.

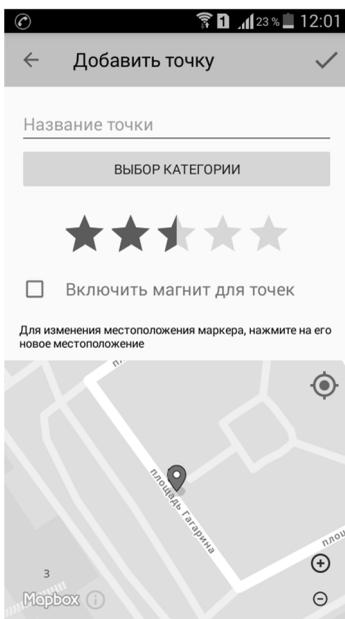


Рис. 2. Фрагмент формы GeTS supplement для добавления точки

4. Построение маршрутов. По результатам анализа существующих библиотек для построения маршрутов была выбрана библиотека с открытым исходным кодом GraphHopper (<https://graphhopper.com>). Основным преимуществом библиотеки является использование данных OpenStreetMap, что дает возможность их модификации и дополнения данных.

В проекте «Социальный навигатор» применяется алгоритм маршрутизации, описанный в [26]. Для определения кратчайшего пути кроме веса ребер графа дорог, полученного с помощью стандартного алгоритма маршрутизации, используются классификация типов дорог и привязка препятствий к ребрам графа. В данных OpenStreetMap тип дороги определяется атрибутом «highway», в зависимости от его значения можно определить дороги, подходящие или не рекомендуемые для перемещения пешеходов. В ходе анализа данных OpenStreetMap были сформированы 3 класса дорог.

1. Дороги, предназначенные для движения пешеходов или с наличием преимущественного права у пешеходов. Перечень типов дорог представлен в таблице 4. Для таких типов дорог используется коэффициент $R = 1$.

Таблица 4. Атрибуты предпочтительных дорог для пешеходов

Атрибут	Описание значения
highway=residential	Для обозначения улиц и переулков, которые проходят вокруг и между жилых зон
highway=service	Подъезд во двор, к зданию, к пляжу, кемпингу, промышленной недвижимости, бизнес-парку и так далее
highway=living_street	Для обозначения улиц со знаками 5.21 и 5.22 «Жилая зона»
highway=pedestrian	Выделенные для пешеходов улицы и площади городов, имеющих твердое (негрунтовое) покрытие
highway=footway	Пешеходные дорожки, выделенные или исключительно, или в основном для пешеходов
highway=steps	Обозначение лестниц и лестничных пролетов
highway=path	Этот тег используется для обозначения стихийных пешеходных троп, троп, используемых для передвижения на лыжах, велосипеде, лошадях

2. Дороги, не предназначенные для движения пешеходов. Перечень типов дорог представлен в таблице 5. Для таких типов дорог используется заградительный коэффициент $R = 10$. Дороги таких типов используются для обеспечения связности графа и применяются в случае отсутствия других вариантов (например, дорога регионального значения, используемая в качестве центральной улицы населенного пункта).

Таблица 5. Атрибуты нежелательных дорог для пешеходов

Атрибут	Описание значения
highway=primary	Автомобильные дороги регионального значения, соединяющие крупные города и/или областные центры
highway=secondary	Автомобильные дороги областного значения, соединяющие областные центры с крупными населенными пунктами, а также крупные населенные пункты между собой
highway=tertiary	Важные автомобильные дороги местного значения, которыми соединяются сёла
highway=trunk	Автомобильные дороги федерального значения, межрегиональные трассы, формирующие опорную сеть автодорог страны
highway=motorway	Автомагистрали
highway=unclassified	Дороги, образующие соединительную сеть вне населенных пунктов
highway=bus_guideway	Дорожные полосы со специальными направляющими

3. Дороги, не имеющие преимущественного права у пешеходов. При прохождении таких дорог пешеход движется по обочине или краю проезжей части, пропускает других участников движения и обходит неровности и другие препятствия. Для учета дополнительных затрат на прохождение дороги используется коэффициент $R = 3$.

Значения коэффициентов R были получены при проведении экспериментальных исследований, связанных с построением графов дорог для населенных пунктов разных типов. В дальнейшем значения коэффициентов будут уточняться на основе результатов практического использования сервиса.

Для определения сложности маршрута требуется вычисление весов ребер графа дорог, формирующих маршрут перемещения, с учетом коэффициентов и уровней сложности препятствий. Вес O_i для препятствия i рассчитывается следующим образом:

$$O_i = K(D_i, C),$$

где K — функция определения сложности препятствия на основе таблицы 3, D_i — уровень сложности препятствия i , а C — выбранная категория ограничений. Для ребра j общий вес E_j рассчитывается следующим образом:

$$E_j = W_j * R + \sum_{i \in I_j} O_i,$$

где W_j — вес ребра, определенный заранее, I_j — множество ближайших препятствий. Вес дороги определяется на этапе генерации графа дорог. Вес препятствия и общий вес ребра рассчитывается для каждого запроса на построение маршрута.

В проекте «Социальный навигатор» выполняется расчет трех типов маршрутов:

- «Безопасный маршрут»: все препятствия имеют вес не более 1.
- «Умеренно опасный маршрут» с весом каждого включенного препятствия менее 5.
- «Кратчайший маршрут» — это маршрут с кратчайшим путем без учета стоимости препятствий.

Если невозможно построить «Безопасный маршрут» и/или «Умеренно опасный маршрут», то они не присутствуют в выводе.

Основная проблема использования такого подхода — построение маршрутов через дороги с тротуарами. Алгоритм маршрутизации не может определить правильность поворота, поскольку дорога с тро-

туарами представляет собой одно ребро. Например, на рисунке 3 представлена дорога с тротуарами по обеим сторонам имеющая два «Т» перекрестка в разных направлениях и один «Х» перекресток с тротуаром. Правильный пешеходный путь от пункта А до пункта D идет через точку E, но алгоритм маршрутизации предлагает маршрут А-В-С-Д, хотя в точках В и С отсутствуют пешеходные переходы.

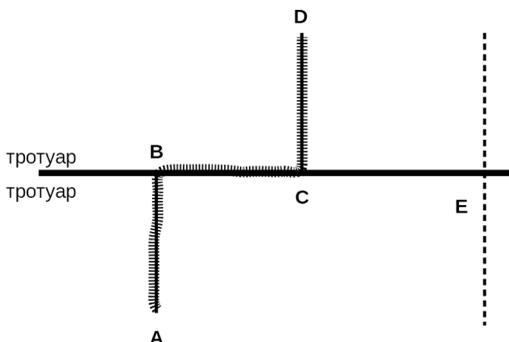


Рис. 3. Пример маршрута через дорогу без отделения тротуаров

Решением является создание отдельных линий тротуаров для пешеходов, проходящих параллельно проезжей части и запрет доступа пешехода к проезжей части [21]. Новые дороги пересекаются со всеми перекрестками, и пешеходы могут пересечь дорогу по умолчанию. Ограничения для пересечения проезжей части могут быть установлены с использованием дорожных препятствий. Полученный граф показан на рисунке 4, и алгоритм маршрутизации, использующий отделение тротуаров от проезжей части, предлагает правильный маршрут.

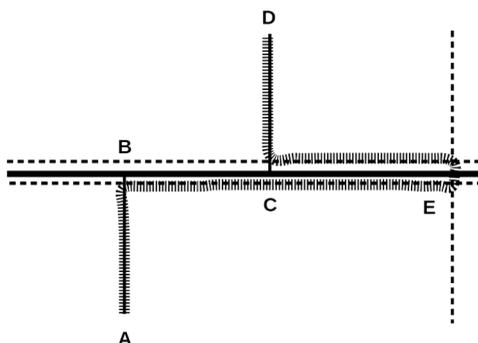


Рис. 4. Пример маршрута через дорогу с отдельными тротуарами

Результат анализа исходных графов позволяет построить более точные пешеходные маршруты. Расширение дорожного графа позволяет более точно устанавливать ограничения движения.

Архитектура проекта «Социальный навигатор» была представлена в работах [26, 27]. Расширенная версия архитектуры с включением картографического сервиса для генерации графа дорог и фрагментов карт показана на рисунке 5. Сервер GeTS используется для хранения данных о дорожных препятствиях. Пользователи могут сохранять найденные препятствия, используя приложение GeTS supplement или через веб-интерфейс. Служба паспортов доступности обеспечивает информирование об ограничениях мобильности на объектах коллективного доступа. Хранилище OSM предоставляет картографическую информацию для мобильных приложений.

Приложение «Социальный навигатор» [26] позволяет создавать маршруты и осуществлять навигацию, используя мобильное устройство. Для людей с нарушениями зрения приложение предоставляет функцию аудио сопровождения. Модульная структура приложения позволяет реализовать комплекс ассистивных информационных технологий [3] для использования людьми с нарушениями зрения, слуха и функций рук.

Картографический сервис использует в качестве источника данных проект OpenStreetMap и генерирует выходные файлы данных для каждой выбранной области [27]. Полученные результаты используются для создания графа дорог в мобильном приложении «Социальный Навигатор», приложении GeTS Supplement, для построения маршрутов в веб-интерфейсе и создания карт.

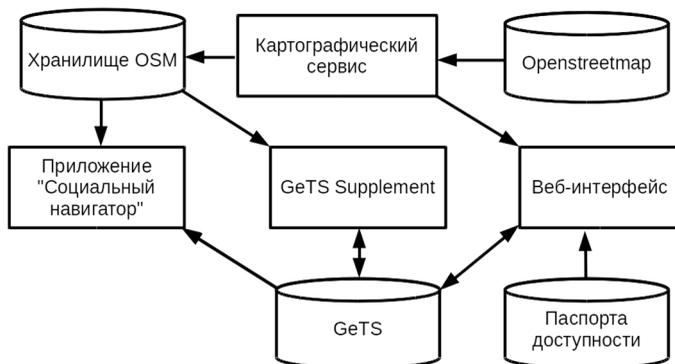


Рис. 5. Архитектура проекта «Социальный навигатор»

Для построения маршрутов пользователь выбирает точки начала и конца маршрута, тип инвалидности, запрос отправляется на серверный скрипт. Скрипт получает список близко расположенных дорожных препятствий и вызывает приложение Graphhopper. Результат возвращается в веб-интерфейс для представления на карте. Снимок экрана веб-

интерфейса показан на рисунке 6. Пользователь может видеть найденные маршруты, оценки сложности прохождения маршрута в баллах, список дорожных препятствий в выбранном маршруте с их описаниями.

5. Объекты коллективного доступа. Информирование людей о доступности объектов коллективного доступа является одной из актуальных задач. В рамках государственной программы «Доступная среда» [4] выполняется формирование паспортов доступности социальных объектов в регионах Российской Федерации. В республике Карелия Министерством здравоохранения и социального развития разработан и введен в эксплуатацию сервис «Паспорт Доступности» [5]. Сервис предназначен для предварительного сбора данных о доступности социально значимых объектов специалистами.



Рис. 6. Построение маршрута в веб-интерфейсе

База данных сервиса «Паспорт Доступности» содержит значительный набор данных, полученных в результате инспектирования объектов социальной инфраструктуры специалистами. Лишь часть этой информации требуется для работы публичных сервисов. Именно эта выборка из первоначального набора данных является основой для работы публичных социальных сервисов. Одним из способов получения результатов паспортизации является использование мобильного приложения «Карта доступности» [26].

В проекте «Социальный навигатор» реализовано взаимодействие с базой данных паспортов доступности, что позволяет пользова-

телю получить более полное описание объекта по сравнению с OpenStreetMap [8]. Обследованные объекты коллективного доступа размещены в веб-интерфейсе GeTS, как показано на рисунке 7.

Каждый объект коллективного доступа представлен в проекте следующей информацией о себе:

- название объекта;
- сфера деятельности объекта;
- место нахождения объекта (фактический адрес);
- описание близлежащих остановок общественного транспорта;
- для каждого вида ограничения мобильности указана:
 - доступность зоны целевого назначения здания;
 - доступность пути движения к объекту (от остановки транспорта);
 - доступность санитарно-гигиенических помещений;
 - доступность системы информации на объекте;
 - доступность территории, прилегающей к зданию (участок).

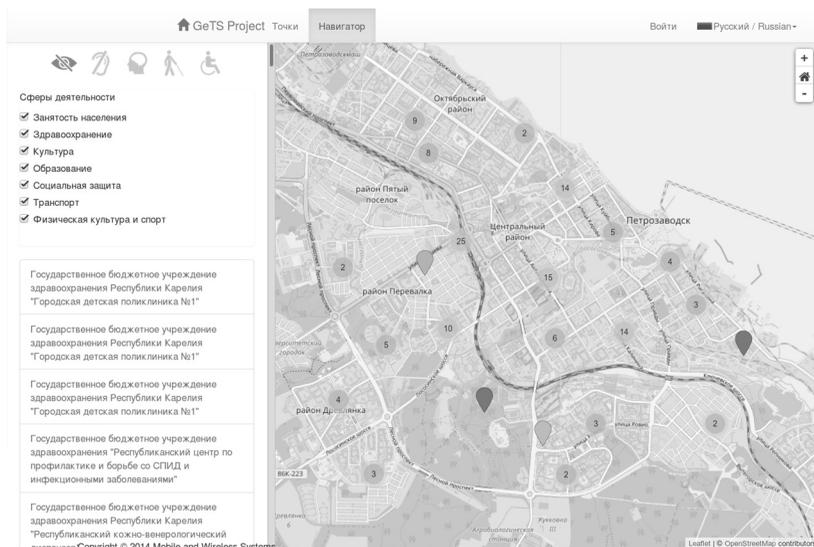


Рис. 7. Отображение объектов коллективного доступа в Web-интерфейсе GeTS

Пользователь может указать тип ограничения возможностей, выбрать объект коллективного доступа и построить маршрут к выбранному объекту. В результате пользователю будет предоставлена информация как о наличии или отсутствии барьеров на пути к объекту коллективного доступа, так и ограничения мобильности внутри объекта коллективного доступа.

6. Апробация результатов. В качестве пилотной зоны для проведения апробации результатов проекта «Социальный навигатор» была выбрана территория республики Карелия. Выполнение ручного обследования было сконцентрировано в городах Петрозаводск, Олонец и Кондопога. Апробация проекта проходила по следующему плану:

1) Загрузка картографических данных о выбранной территории из OpenStreetMap, генерация файлов данных для мобильных приложений и веб-интерфейса.

2) Импорт известных дорожных препятствий из картографических данных.

3) Обследование территории с использованием GeTS Supplement.

4) Анализ результатов сбора дорожных препятствий, построение маршрутов с использованием мобильного приложения «Социальный навигатор» и веб-интерфейса.

В ходе импорта картографических данных был произведен анализ наличия тротуаров и предоставление тротуаров в виде самостоятельных дорожных линий. По результатам анализа было найдено 129 некорректно отмеченных участков дорог, отделено 90 проезжих частей от тротуаров.

Импорт известных дорожных препятствий был разделен на два этапа: поиск дорожных препятствий, соответствующих заданным критериям, и обновление базы данных GeTS. По результатам импорта в базу данных было добавлено 3233 дорожных препятствий.

Обследование территории происходило с привлечением волонтеров из карельской региональной общественной организации инвалидов-опорников «Петросино». В качестве основной территории обследования был выбран центр Петрозаводска. Также были совершены выезды в г. Кондопога и г. Олонец. По результатам обследования были добавлены 533 препятствия. Анализ результатов сбора дорожных препятствий выявил достаточно высокое количество барьеров на пути следования людей с ограниченными возможностями.

Апробация сервиса построения пешеходного маршрута выполнялась на обследованной территории. В ходе апробации было проанализировано отклонение безопасного и умеренно-опасного маршрутов от кратчайшего. В частности, для людей с нарушениями зрения умеренно-опасный маршрут, представленный на рисунке 6, имеет суммарный вес ребер $\sum_{j \in J} E_j = 2635$, проходит через 16 препятствий с суммарным весом

$\sum_{i \in I} O_i = 33,5$ и имеет длину 1319 м. В то же время кратчайший маршрут

имеет меньший общий вес $\sum_{j \in J} E_j = 2584$ и длину в 1307 м, но проходит

через 15 препятствий с суммарным весом $\sum_{i \in I} O_i = 45,5$. По результатам

апробации были выявлены следующие проблемы:

- наличие необследованных территорий (дворы) приводит к построению маршрута через них;
- часть дорог отмечена как доступная для пешеходов, однако проход по ним запрещен;
- алгоритм маршрутизации не учитывает местоположение входа в здание и может привести пользователя к пожарному выходу, который закрыт.

Эти проблемы могут быть решены путем дополнительного обследования и добавления требуемой информации.

7. Заключение. В ходе проекта реализована программная инфраструктура планирования маршрутов для людей с ограниченными возможностями. В составе предложенной инфраструктуры реализованы следующие приложения и сервисы:

- сервис сбора данных о дорожных препятствиях, предоставляющий возможность добавлять и редактировать препятствия, публиковать информацию в открытое пространство;
- картографический сервис для генерации графа пешеходных дорог и фрагментов карт;
- хранилище, содержащее данные о препятствиях, социальных объектах и их доступности.
- сервис построения пешеходного маршрута, использующий граф дорог, и алгоритм, учитывающий привязку препятствий к ребрам графа для увеличения веса ребра в зависимости от сложности препятствия и вида ограничения возможностей пользователя;
- мобильное приложение «Социальный навигатор» в котором используются сервис построения маршрутов и сопровождение, возможность адаптации для различных типов инвалидности, например, для слабовидящих пользователей реализовано аудио сопровождение при перемещении по маршруту.

В ходе работы получены следующие результаты:

- средствами сети Интернет и мобильных приложений изучена мировая практика по поддержке людей с ограниченными возможностями; выявлено, что среди решений отсутствует комплексное предоставление информации о доступности объектов и маршрутов следования;
- предложены подходы к созданию информационной инфраструктуры для людей с ограниченными возможностями, разработано архитектурное решение, связывающее несколько сервисов реализующих разные функции;

– реализована возможность сбора данных о препятствиях «на местности» с использованием мобильного приложения, а также возможность работы с точками-препятствиями посредством web-интерфейса;

– предложены подходы к повышению точности расстановки препятствий на карте для дальнейшего использования при построении маршрута — возможность ручной коррекции расположения точек, привязка точек к участкам дорог;

– построен граф пешеходных дорог для пилотной зоны проекта на основе стандартного графа дорог сервиса OSM с использованием алгоритма выявления участков наиболее безопасных для перемещения людей с ограничениями;

– реализовано приложение для построения маршрутов, определяющее маршруты разной степени доступности и безопасности с учетом видов ограничений.

При проведении апробации разработанных сервисов было выявлено, что инфраструктура населенных пунктов пилотного региона слабо адаптирована к самостоятельному перемещению людей с ограничениями, особенно инвалидов-колясочников. В таких условиях создание и расширение информационной инфраструктуры способно существенно облегчить выбор подходящего маршрута, а также расширить «зону доступности» объектов и услуг [28]. Повышение информированности позволяет людям с ограниченными возможностями увеличить их личную мобильность, упростить доступ к социальным услугам и сервисам, повысить вовлеченность в жизнь местного сообщества.

Разработанная программная инфраструктура может быть интегрирована с другими проектами по сбору информации о препятствиях и сопровождению людей с ограниченными возможностями. В частности, с проектами «Народная карта Яндексa» (<http://n.maps.yandex.ru>) и «Говорящий город» (<http://www.speakingcity.org/>).

Литература

1. Конвенция о правах инвалидов. Организация объединенных наций. URL: <https://documents-dds-ny.un.org/doc/UNDOC/GEN/N06/500/79/PDF/N0650079.pdf> (дата обращения: 24.04.2017).
2. Терскова С.Г. Механизм формирования доступной среды для инвалидов // Гуманитарные научные исследования. 2015. № 7. URL: <http://human.snauka.ru/2015/07/12062> (дата обращения: 24.04.2017).
3. Карнов А.А. Ассистивные информационные технологии на основе аудиовизуальных речевых интерфейсов // Труды СПИИРАН. 2013. Вып. 4(27). С. 114–128.
4. «Доступная среда» для людей с ограниченными возможностями. URL: <http://zhit-vmeste.ru/> (дата обращения: 24.04.2017).

5. *Apanasik Y., Shabalina I., Shabaev A.* “Accessibility Passports” Service for Information Social Infrastructure // Proc. of the 14th Conference of Finnish-Russian University Cooperation in Telecommunications Program. Spb.: SUAI. 2013. pp. 3–8.
6. *Karimi H.A., Jiang M., Zhu R.* Pedestrian navigation services: challenges and current trends // *Geomatica*. 2013. vol. 67. no. 4. pp. 259–271.
7. Wheelchair routing — OpenStreetMap Wiki. URL: http://wiki.openstreetmap.org/wiki/Wheelchair_routing (дата обращения 24.04.2017).
8. *Weyrer T., Hochmair H., Paulus G.* Intermodal door-to-door routing for people with physical impairments in a web-based, open-source platform // *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2014. vol. 2469. pp. 108–119.
9. *Ding D. et al.* Design considerations for a personalized wheelchair navigation system // 29th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBS 2007). 2007. pp. 4790–4793.
10. *Kasemsuppakorn P., Karimi H.A.* Personalized routing for wheelchair navigation // *Journal of Location Based Services*. 2009. vol. 3. no. 1. pp. 24–54.
11. *Alshraideh M. et al.* A robotic intelligent wheelchair system based on obstacle avoidance and navigation functions // *Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence*. 2015. vol. 27. no. 4. pp. 471–482.
12. *Levine S.P. et al.* The NavChair assistive wheelchair navigation system // *IEEE transactions on rehabilitation engineering*. 1999. vol. 7. no. 4. pp. 443–451.
13. *Dornhofer M., Bischof W., Krajnc E.* Comparison of Open Source routing services with OpenStreetMap Data for blind pedestrians // *Online Proceedings FOSS4G-Europe 2014*. 2014. pp. 1–6.
14. *Kammoun S. et al.* Route selection algorithm for blind pedestrian // *Control Automation and Systems (ICCAS)*. 2010. pp. 2223–2228.
15. *Chen M. et al.* An object-oriented data model built for blind navigation in outdoor space // *Applied Geography*. 2015. vol. 60. pp. 84–94.
16. *Ren M., Karimi H.A.* Movement pattern recognition assisted map matching for pedestrian/wheelchair navigation // *Journal of Navigation*. 2012. vol. 65. no. 04. pp. 617–633.
17. СП 59.13330.2012 Доступность зданий и сооружений для маломобильных групп населения // М.: Минстрой России. 2015.
18. О методических рекомендациях, нацеленных на устранение наиболее часто встречающихся барьеров на пути следования инвалидов и других маломобильных групп населения при посещении административных зданий и служебных помещений: письмо Министерства здравоохранения и социального развития РФ от 11 апреля 2012 г. N 30-7/10/2-3602. 2012. URL: <http://base.garant.ru/70216056/#block16#ixzz4esufMquK> (дата обращения 24.04.2017).
19. *Акбашева З.Р., Давыдова Е.М., Казакова Т.Д., Радченко В.Ю.* Организация доступной среды в вузе посредством визуальной навигационной системы // *Современные научные исследования и инновации*. 2017. № 3. URL: <http://web.snauka.ru/issues/2017/03/79149> (дата обращения: 24.04.2017).
20. *Prandi F. et al.* Collaboratively collected geodata to support routing service for disabled people // *Proceedings of the 11th international Symposium on Location-Based Services*. 2014. pp. 67–79.
21. *Neis P., Zielstra D.* Generation of a tailored routing network for disabled people based on collaboratively collected geodata // *Applied Geography*. 2014. vol. 47. pp. 70–77.

22. *Karimi H.A., Zhang L., Benner J.G.* Personalized accessibility map (PAM): A novel assisted wayfinding approach for people with disabilities // *Annals of GIS*. 2014. vol. 20. no. 2. pp. 99-108.
23. *Prandi C., Salomoni P., Mirri S.* mPASS: integrating people sensing and crowdsourcing to map urban accessibility // *Consumer Communications and Networking Conference (CCNC)*. 2014. pp. 591-595.
24. *Rice R.M. et al.* Position validation in crowdsourced accessibility mapping // *Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization*. 2016. vol. 51. no. 2. pp. 55-66.
25. *Balandina E. et al.* Innovative e-tourism services on top of Geo2Tag LBS platform // *11th International Conference on Signal-Image Technology & Internet-Based Systems (SITIS)*. 2015. pp. 752-759.
26. *Kulakov K. et al.* "Accessibility Map" and "Social navigator" services for persons with disabilities // *Proceedings of 15th Conference of Open Innovations Association FRUCT*. 2014. pp. 69-76.
27. *Kulakov K., Zavyalova Y., Shabalina I.* Navigation Infrastructure for People with Disabilities // *Proceedings of 20th Conference of Open Innovations Association (FRUCT)*. 2017. pp. 209-215.
28. *Семенов С.П., Славский В.В., Ташкин А.О.* Анализ информационных ресурсов, направленных на удовлетворение информационных потребностей людей с ограниченными возможностями // *Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Информационные технологии*. 2016. Т. 14. №. 1. С. 83-102.

Кулаков Кирилл Александрович — доцент, доцент кафедры информатики и математического обеспечения, Петрозаводский государственный университет (ПетрГУ). Область научных интересов: диофантовы уравнения, интеллектуальные пространства, электронный туризм, анализ данных. Число научных публикаций — 32. kulakov@cs.karelia.ru, <http://cs.karelia.ru/~kulakov/>; пр. Ленина, 33, Петрозаводск, 185910; р.т.: +7(8142)711015.

Завьялова Юлия Вячеславовна — младший научный сотрудник подразделения «управление научных исследований», Петрозаводский государственный университет (ПетрГУ). Область научных интересов: методы и системы интеллектуального анализа данных и распознавания образов, программные модели и системы, интеллектуальные Интернет-технологии в медицине. Число научных публикаций — 10. yzavyalo@cs.karelia.ru; пр. Ленина, 33, Петрозаводск, 185910; р.т.: +7(8142)711015.

Шабалина Ирина Михайловна — доцент кафедры прикладной математики и кибернетики, Петрозаводский государственный университет (ПетрГУ), ведущий программист, Центр Систем Автоматизации. Область научных интересов: математическое моделирование, прикладные статистические методы, разработка информационных систем. Число научных публикаций — 41. ishabalina@opti-soft.ru; пр. Ленина, 33, Петрозаводск, 185910; р.т.: +7(8142)713-226, Факс: +7(8142)713-216.

Поддержка исследований Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда содействия инновациям (проект «УМНИК» № 6893/2015 на 2015-2017 года).

K.A. KULAKOV, Y.V. ZAVYALOVA, I.M. SHABALINA
**SOCIAL NAVIGATOR: IMPLEMENTATION OF THE SOFTWARE
 INFRASTRUCTURE OF ROUTE PLANNING FOR PEOPLE WITH
 DISABILITIES**

K.A. Kulakov, Y.V. Zavyalov, I.M. Shabalina **Social Navigator: Implementation of the Software Infrastructure of Route Planning for People with Disabilities.**

Abstract. An important task of the modern society is to provide people with disabilities with all rights, and in particular, the rights to free movement. The article presents the implementation of the project "Social Navigator" aimed at creating an information infrastructure to support people with disabilities when traveling through the city. The project implements technologies that extend the capabilities of modern software tools for building routes. Ways to organize and use data on road obstacles and availability of social significance objects are considered. Particular attention is paid to assessing the complexity of obstacles, depending on the availability of the route based on the types of users' capabilities limitations and the impact of obstacles. The project implemented the task of constructing a route taking into account road type and obstacles, as well as the adaptation of the information about standard map services to be used for the construction of pedestrian routes for people with disabilities. The software infrastructure includes services for the collection and expert evaluation of obstacles, mapping service for generating a road graph, a service for collecting data on the availability of social objects, an application that allows building routes and navigating using a mobile device. For the end users, the web and mobile versions of the implemented services are available. The proposed infrastructure improves the quality of life of people with disabilities by organizing their personal mobility, simplifying access to social services and services, and fully engaging in the local community life.

Keywords: accessible environment, routing, mobility, social navigator, availability passport.

Kulakov Kirill Alexandrovich — Ph.D., associate professor, associate professor of informatics and mathematics department, Petrozavodsk State University (PetrSU). Research interests: diophantine equations, smart spaces, e-tourism, data analysis. The number of publications — 32. kulakov@cs.karelia.ru, <http://cs.karelia.ru/~kulakov>; 33, Lenin str., Petrozavodsk, 185910, Russia; office phone: +7(8142)711015.

Zavyalova Yulia Vyacheslavovna — junior researcher of "management of scientific research" division, Petrozavodsk State University (PetrSU). Research interests: methods and systems of data mining and recognition, software models and systems, intelligent Internet technologies in medicine. The number of publications — 10. yzavyalo@cs.karelia.ru; 33, Lenin str., Petrozavodsk, 185910, Russia; office phone: +7(8142)711015.

Shabalina Irina Mikhailovna — Ph.D., associate professor of applied mathematics and cybernetics department, Petrozavodsk State University (PetrSU), leading programmer, Center for Automation Systems. Research interests: mathematical modeling, applied statistical methods, development of information systems. The number of publications — 41. ishabalina@opti-soft.ru; 33, Lenin str., Petrozavodsk, 185910, Russia; office phone: +7(8142)713-226, Fax: +7(8142)713-216.

Acknowledgements. This research is supported by the Foundation for Assistance to Small Innovative Enterprises in Science and Technology within project # 6893/2015 for 2015–2017 of “UMNIK” program.

References

1. Конвенция о правах инвалидов. Организация об#единенных наций [Convention on the rights of persons with disabilities. United Nations]. 2007. Available at: https://documents-dds-ny.un.org/doc/UNDOC_GEN/N06/500/79/PDF/N0650079.pdf. (accessed: 24.04.2017).
2. Terskova S.G. [Formation mechanism of an accessible environment for people with disabilities]. *Gumanitarnye nauchnye issledovaniya – Humanitarian research*. 2015. vol. 7. Available at: <http://human.snauka.ru/2015/07/12062>. (accessed: 24.04.2017). (In Russ.).
3. Karpov A.A. Assistive Information Technologies based on Audio-Visual Speech Interfaces]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*. 2013. vol. 4(27). pp. 114–128.
4. Dostupnaya sreda dlya lyudej s ogranichennymi vozmozhnostyami [Accessible environment for people with disabilities]. Available at: <http://zhit-vmeste.ru/>. (accessed: 24.04.2017). (In Russ.).
5. Apanasik Y., Shabalina I., Shabaev A. “Accessibility Passports” Service for Information Social Infrastructure. Proc. of the 14th Conference of Finnish-Russian University Cooperation in Telecommunications Program. Spb.: SUAI. 2013. pp. 3–8.
6. Karimi H. A., Jiang M., Zhu R. Pedestrian navigation services: challenges and current trends. *Geomatica*. 2013. vol. 67. no. 4. pp. 259–271.
7. Wheelchair routing — OpenStreetMap Wiki. Available at: http://wiki.openstreetmap.org/wiki/Wheelchair_routing (accessed: 24.04.2017).
8. Weyrer T., Hochmair H., Paulus G. Intermodal door-to-door routing for people with physical impairments in a web-based, open-source platform. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2014. vol. 2469. pp. 108–119.
9. Ding D. et al. Design considerations for a personalized wheelchair navigation system. 29th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBS 2007). 2007. pp. 4790–4793.
10. Kasemsuppakorn P., Karimi H.A. Personalized routing for wheelchair navigation. *Journal of Location Based Services*. 2009. vol. 3. no. 1. pp. 24–54.
11. Alshraideh M. et al. A robotic intelligent wheelchair system based on obstacle avoidance and navigation functions. *Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence*. 2015. vol. 27. no. 4. pp. 471–482.
12. Levine S. P. et al. The NavChair assistive wheelchair navigation system. *IEEE transactions on rehabilitation engineering*. 1999. vol. 7. no. 4. pp. 443–451.
13. Dornhofer M., Bischof W., Krajnc E. Comparison of Open Source routing services with OpenStreetMap Data for blind pedestrians. Online Proceedings FOSS4G-Europe 2014. 2014. pp. 1–6.
14. Kammoun S. et al. Route selection algorithm for blind pedestrian. Control Automation and Systems (ICCAS). 2010. pp. 2223–2228.
15. Chen M. et al. An object-oriented data model built for blind navigation in outdoor space. *Applied Geography*. 2015. vol. 60. pp. 84–94.
16. Ren M., Karimi H.A. Movement pattern recognition assisted map matching for pedestrian/wheelchair navigation. *Journal of Navigation*. 2012. vol. 65. no. 04. pp. 617–633.
17. Svod pravil 59.13330.2012 dostupnost zdaniy i sooruzhenij dlya malomobilnyh grupp naseleniya [Code of Regulations 59.13330.2012 Availability of buildings and structures for low-mobile groups of the population]. Moscow.: Ministroy rossii. 2015. (In Russ.).

18. O metodicheskikh rekomendatsiyah, naceleennyh na ustranenie naibolee chasto vstrechayushchihsya bar'erov na puti sledovaniya invalidov i drugih malomobil'nyh grupp naseleniya pri poseshchenii administrativnyh zdaniy i sluzhebnyh pomeshchenij: pis'mo Ministerstva zdrazvoohraneniya i social'nogo razvitiya RF ot 11 aprelya 2012 g. N 30-7/10/2-3602. 2012. [On the methodical recommendations aimed at eliminating the most common barriers to the movement of disabled people and other low-mobility groups when visiting administrative buildings and offices: a letter from the Ministry of Health and Social Development of the Russian Federation of April 11, 2012 No. 30-7 / 10 / 2- 3602. 2012.]. Available at: <http://base.garant.ru/70216056/#block16#ixzz4esufMquK> (accessed: 24.04.2017). (In Russ.).
19. Akbasheva Z.R., Davydova E.M., Kazakova T.D., Radchenko V.Yu. [Organization of an accessible environment in the university through a visual navigation system]. *Sovremennye nauchnye issledovaniya i innovacii – Modern scientific research and innovations*. 2017. vol. 3. Available at: <http://web.snauka.ru/issues/2017/03/79149> (accessed: 24.04.2017). (In Russ.).
20. Prandi F. et al. Collaboratively collected geodata to support routing service for disabled people. *Proceedings of the 11th international Symposium on Location-Based Services*. 2014. pp. 67–79.
21. Neis P., Zielstra D. Generation of a tailored routing network for disabled people based on collaboratively collected geodata. *Applied Geography*. 2014. vol. 47. pp. 70–77.
22. Karimi H.A., Zhang L., Benner J.G. Personalized accessibility map (PAM): A novel assisted wayfinding approach for people with disabilities. *Annals of GIS*. 2014. vol. 20. no. 2. pp. 99–108.
23. Prandi C., Salomoni P., Mirri S. mPASS: integrating people sensing and crowdsourcing to map urban accessibility. *Consumer Communications and Networking Conference (CCNC)*. 2014. pp. 591–595.
24. Rice R.M. et al. Position validation in crowdsourced accessibility mapping. *Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization*. 2016. vol. 51. no. 2. pp. 55–66.
25. Balandina E. et al. Innovative e-tourism services on top of Geo2Tag LBS platform. *11th International Conference on Signal-Image Technology & Internet-Based Systems (SITIS)*. 2015. pp. 752–759.
26. Kulakov K. et al. “Accessibility Map” and “Social navigator” services for persons with disabilities. *Proceedings of 15th Conference of Open Innovations Association FRUCT*. 2014. pp. 69–76.
27. Kulakov K., Zavyalova Y., Shabalina I. Navigation Infrastructure for People with Disabilities. *Proceedings of 20th Conference of Open Innovations Association (FRUCT)*. 2017. pp. 209–215.
28. Semenov S.P., Slavskii V.V., Tashkin A.O. [The analysis of the information resources directed on satisfaction in information needs of physically disabled people]. *Vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Informacionnye tehnologii – Bulletin of Novosibirsk State University. Series: Information technology*. 2016. vol. 14. no. 1. pp. 83–102.

В.В. МИРОНОВ, А.С. ГУСАРЕНКО, Н.И. ЮСУПОВА
**СТРУКТУРИРОВАНИЕ ВИРТУАЛЬНЫХ
МУЛЬТИДОКУМЕНТОВ В СИТУАЦИОННО-
ОРИЕНТИРОВАННЫХ БАЗАХ ДАННЫХ С ПОМОЩЬЮ
ENTRY-ЭЛЕМЕНТОВ**

Миронов В. В., Гусаренко А. С., Юсупова Н. И. Структурирование виртуальных мультидокументов в ситуационно-ориентированных базах данных с помощью entry-элементов.

Аннотация. В статье рассматриваются ситуационно-ориентированные базы данных — информационный процессор в составе веб-приложения, обрабатывающий XML-документы на основе иерархической ситуационной модели (HSM — Hierarchical Situational Model). На данном этапе развития СОБД является репозиторием документов и частью направления NoSQL. Хранилище отображается на гетерогенные документы и обрабатывается в контексте текущей ситуации. Обсуждаются способы задания в HSM виртуальных мультидокументов (ВМД) как совокупности экземпляров документов, отображаемых на реальные данные в различных физических хранилищах. Предлагается структурированный подход, при котором каждый виртуальный документ, входящий в состав ВМД, задается именованным entry-элементом в составе doc-элемента, задающего ВМД в целом и ссылки на такие документы. Внутри entry-элементов, имеющих уникальные имена, указываются запросы на выборку из хранилища XML-документов. Подход иллюстрируется на примерах ВМД, отображаемых на реальные данные в виде таблиц базы данных MySQL, zip-архивов, XML-файлов, веб-сервисов. Благодаря использованию entry-элементов соблюдается принцип инвариантности включая случай, когда изменение отображения не влияет на часть модели с виртуальными документами. Структура виртуальных мультидокументов в СОБД с использованием entry-элементов реализована на платформе PHP сайта СОБД, где доступны образцы программного кода.

Ключевые слова: ситуационно-ориентированная база данных, веб-приложение, управление на основе встроенной модели, иерархическая ситуационная модель, виртуальный мультидокумент, интеграция данных, HSM, NoSQL, XML, DOM, MySQL, PHP.

1. Введение. Ситуационно-ориентированные базы данных (СОБД) — подход к обработке документов в веб-приложениях на основе иерархической ситуационной модели. Данный подход развивается в русле направлений Model-Driven Approach — управление веб-приложениями на основе высокоабстрактных моделей и нотаций [1-7], и NoSQL (Not only SQL) — использование нереляционных баз данных наряду с реляционными [8-16]. СОБД рассматривается как виртуальное хранилище XML-документов, отображаемое на множество разнородных реальных документов [17-20]. Доступ к данным осуществляется в контексте текущей ситуации, автоматически отслеживаемой в соответствии со встроенной ситуационной моделью. Тем самым СОБД дает возможность разработчику задавать условия и правила доступа к данным в ситуационно-ориентированной форме, что упрощает программирование

приложений, обслуживающих бизнес-процессы с ситуационным характером развития. Архитектура СОБД (рисунок 1) включает:

- встроенные ситуационные модели бизнес-процесса HSM (Hierarchical Situation Model), заданные в декларативной форме в виде иерархии состояний и переходов;
- интерпретатор ситуационных моделей (HSM Interpreter) — программу, обрабатывающую ситуационные модели по внешним запросам;
- модели текущего состояния CSM (Current State Model) для отдельных HSM, создаваемые интерпретатором в процессе обработки и сохраняемые между циклами интерпретации;
- виртуальное хранилище XML-документов, отображаемое на множество реальных хранилищ.

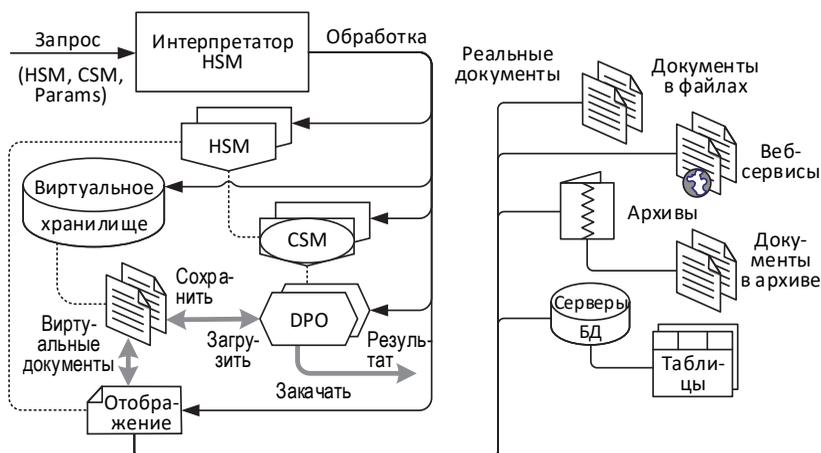


Рис. 1. Архитектура СОБД с виртуальным хранилищем документов [17]

Интерпретатор ситуационных моделей по запросу выполняет цикл обработки с заданными параметрами модели HSM в контексте указанной модели CSM. В ходе интерпретации обновляются текущие состояния в CSM; создаются объекты обработки данных DOM (Document Object Model), в которые загружаются (Load) виртуальные документы, обрабатываются и сохраняются (Save) или возвращаются в качестве результата запроса (Result). Документы виртуального хранилища отображаются на реальные гетерогенные (разнородные) хранилища данных: файловую систему веб-сервера — документы в виде размеченных текстовых файлов; веб-сервисы — документы из сети Интернет; zip-архивы — документы в виде заархивированных файлов; серверы баз данных — документы в таблицах MySQL.

Ситуации в HSM-модели описываются с помощью элементов состояний **sta**, дочерние элементы которых задают определение и обработку виртуальных документов. Для определения виртуального документа служит doc-элемент **doc**, задающий его отображение на реальные данные. Обработку задает dom-элемент **dom**, для которого на цикле интерпретации создается DOM-объект для загрузки и обработки XML-документа. Источники и приемники данных, задаваемые с помощью элементов, дочерних для dom-элемента: src-элементов **src**, определяющих загрузку XML-документа в родительский DOM-объект, и rcv-элементов **rcv**, определяющих обработку и выгрузку XML-документа из родительского DOM-объекта. Загруженный документ подвергается обработке, например, с помощью XSL-трансформации.

2. Обсуждение задачи обработки гетерогенных данных.

2.1. Подходы к обработке гетерогенных данных. Характерная особенность современных интернет-данных — их гетерогенность, то есть большое разнообразие форматов физического представления, поэтому развитие подходов и методов обработки гетерогенных данных в веб-приложениях — актуальное направление исследований. На практике широко распространено традиционное «ручное» проектирование и программирование, когда разрабатывается неформализованное техническое задание, служащее основой для программирования функциональности на каком-либо языке серверных сценариев. Это потенциально позволяет максимально учесть особенности тех или иных форматов данных, применить для них эффективные программистские решения. Однако, как правило, подход характеризуется большой трудоемкостью и требует высокой квалификации программистов. Стремление снизить трудоемкость привело к применению на этапе проектирования высокоабстрактных моделей, декларативно описывающих функции веб-приложения [1-4]. Это снижает трудоемкость этапа программирования, позволяя использовать паттерны проектирования (Software Design Patterns), а в ряде случаев автоматизировать создание фрагментов программного кода. Тем не менее остается значительный объем программистской работы, который необходимо выполнять вручную. Следующее направление исследований в рамках данного подхода, активно развиваемое в настоящее время, — применение *встраиваемых* высокоабстрактных моделей [5-9], когда модели функционирования, созданные на этапе проектирования, транслируются в машиночитаемую форму и непосредственно используются как основа для управления веб-приложением. Одной из актуальных проблем текущего развития дан-

ного направления является ориентация на определенные форматы данных и отсутствие в декларативных моделях выразительных средств для гибкого управления гетерогенностью данных, позволяющих разработчику легко изменять форматы данных без существенной переработки модели. Концепция СОБД развивается авторами именно в этом направлении, и в данной статье представлены новые решения по обеспечению гибкого задания гетерогенности в декларативных HSM-моделях.

2.2. Виртуальные мультидокументы. Важным аспектом концепции СОБД является возможность гибкой работы с гетерогенными документами (различных форматов в разнородных хранилищах). Для обеспечения гибкости в HSM-моделях используется понятие *виртуального* документа, который обрабатывается интерпретатором как XML-документ, а физически может храниться в других форматах. В работе [20] авторами предложено понятие виртуального *мультидокумента* (ВМД) как множества экземпляров виртуальных документов со своими отображениями на реальные данные. Это упрощает задание в HSM-модели общих свойств для множества близких виртуальных документов и обеспечивает инвариантность виртуальных документов по отношению к различным видам отображения на реальные хранилища данных так, чтобы задание другого отображения не сопровождалось изменением модели в части обработки виртуальных документов.

2.3. Пример виртуального мультидокумента. На рисунке 2 иллюстрируется задание ВМД в HSM-модели и использование его для загрузки в DOM-объект сложного XML-документа, формируемого «на лету» из трех XML-документов, хранящихся в базе данных MySQL.

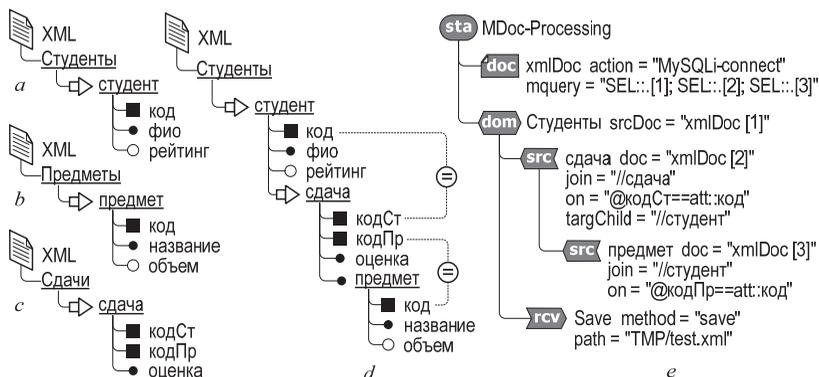


Рис. 2. Формирование сложного документа: *a, b, c* — XML-модели исходных документов; *d* — XML-модель результирующего документа; *e* — фрагмент HSM-модели с виртуальным мультидокументом, отображаемым на базу данных MySQL

Используется три исходных XML-документа с данными о студентах, о предметах и о сдачах студентами предметов соответственно (рисунок 2а-с). Документы выполнены в виде «плоских» XML-документов в атрибутоцентрическом стиле: каждый из них содержит корневой XML-элемент и множество (возможно, пустое) дочерних XML-элементов, в XML-атрибутах которых записаны собственно данные. XML-документ, который должен быть построен из исходных XML-документов и загружен в DOM-объект для обработки, представлен моделью на рисунке 2d. Он содержит данные о студентах, причем для каждого студента приведены данные о его сдачах, включая данные о сданном предмете. Предполагается, что исходные XML-документы хранятся на сервере MySQL в базе данных hsm в так называемом «сосредоточенном» виде, то есть документы целиком размещены в ячейках таблицы, а именно — в таблице xmldocs, в поле doc первой, второй и третьей строки (поле id = 1, 2, 3).

Приведенный фрагмент ситуационной модели `sta:MDocProcessing` (рисунок 2d) решает задачу формирования результирующего документа. ВМД `doc:xmldoc` устанавливает соединение с базой данных MySQL (по умолчанию: хост — `localhost`; пользователь — `hsm`; пароль — `hsm`; база данных — `hsm`; порт и сокет — `NULL`) и задает три отображения выборки данных (`SELECT`) из указанных ячеек таблицы. Элемент `dom:Студенты` порождает DOM-объект `Студенты` и загружает в него документ с данными о студентах (атрибут `srcDoc`, ссылающийся на первую выборку данных — скрытый источник данных). Явный источник данных `src:сдача`, ссылающийся на вторую выборку данных, извлекает документ с данными о сдачах и для каждого узла студента добавляет дочерние узлы о сдачах этого студента. Для этого в источнике предусмотрены атрибуты: `join` — задает XPath-выражение — множество узлов в дочернем документе, в котором ищутся узлы для присоединения к узлам в родительском документе, в данном случае — множество XML-элементов `Сдача` в документе `Сдачи`; `targetChild` — задает XPath-выражение — множество узлов в родительском документе, для каждого из которых ищутся присоединяемые узлы в дочернем документе — в данном случае это множество XML-элементов `студент` в документе `Студенты`; `on` — задает условие соединения, которому должен удовлетворять дочерний узел для присоединения к родительскому узлу, в данном случае это требование, чтобы атрибут `кодСт` узла `сдача` совпадал с атрибутом `код` узла `студент`. Далее аналогичным образом источник данных `src:предмет`, ссылающийся на третью выборку данных, извлекает документ с данными о предметах и для каждого узла сдачи добавляет дочерний узел о предмете этой сдачи. Предусмотрен-

ный в dom-элементе приемник данных `rcv:Save` имитирует обработку результирующего документа, выполняя тестовое сохранение контента DOM-объекта в файле `TMP/test.xml`.

2.4. Недостатки. В рассмотренном примере недостатки носят стилистический характер и связаны с отсутствием структурирования при задании ВМД в ситуационной модели, что затрудняет их понимание и анализ:

– громоздкие выражения, сосредоточенные в одном атрибуте. В рассмотренном примере используется компактный синтаксис для стандартизованных запросов, в общем случае может потребоваться размещать в атрибуте `mquery` сложные SQL-запросы, которые громоздки сами по себе, а в случае мультидокумента их будет несколько;

– нет информации о назначении каждого отображения в мультидокументе. Отдельные запросы представлены как элементы общего списка. Человек, изучающий модель, не снабжается подсказками относительно назначения того или иного запроса;

– сложность сопоставления ссылки и соответствующего отображения. Ссылки на отдельные запросы мультидокумента осуществляются с помощью индекса, задающего положение элемента в списке, например `xmlDoc[3]` — ссылка на третий элемент ВМД (причем нужно помнить, что нумерация начинается с единицы, а не с нуля, как в некоторых языках программирования).

Указанные недостатки особенно проявляются в случае громоздких определений и большого их числа. Например, для доступа к веб-сервисам требуется указать URL (интернет-адрес) ресурса, зачастую с несколькими параметрами. Так, на рисунке 3 представлена модель виртуального мультидокумента `doc:CentroBank`, задающего отображение на четыре веб-сервиса Центробанка России (справочник по кодам валют, списки котировок валюты на последнюю дату, динамики котировок доллара США и драгоценных металлов за 2017 г.). Как можно увидеть, атрибут `mpath` в громоздкой и трудночитаемой форме задает интернет-адреса для извлечения нужных сведений. На рисунке 3 приведена только часть веб-сервисов Центробанка, всего их более десятка, то есть при задании всех веб-сервисов `doc`-элемент станет еще более запутанным.

```
<doc CentroBank mpath = "  
http://www.cbr.ru/scripts/XML_val.asp?d=0;  
http://www.cbr.ru/scripts/XML_daily.asp;  
http://www.cbr.ru/scripts/XML_dynamic.asp?date_req1=01/01/2017&date_req2=31/12/  
2017&VAL_NM_RQ=R01235;  
http://www.cbr.ru/scripts/xml_metall.asp?date_req1=01/01/2017&date_req2=31/12/2017"
```

Рис. 3. Пример неструктурированного задания виртуального мультидокумента с отображением на XML-сервисы Центробанка России

При этом многие веб-сервисы требуют указания большого количества параметров запроса, что делает запросы еще более громоздкими и менее читабельными. Таким образом, возникает потребность в более ясной и понятной форме представления совокупности отдельных виртуальных документов в составе мультидокумента.

2.5 Идея структурированного описания мультидокументов.

Для устранения указанных недостатков (снижения их влияния) предлагается структурированное задание ВМД, при котором его отдельные компоненты задаются с помощью специальных дочерних entry-элементов (отображаются символом **ent** на графическом представлении ситуационной модели). Каждому entry-элементу присваивается уникальное имя, которое несет информацию о назначении компонента и по которому на него можно ссылаться из других частей ситуационной модели. Структурирование с помощью entry-элементов делает описание более «рельефным» по сравнению с монотонным списком в атрибуте `mpath`. Ссылка по имени более понятна и быстрее отыскивается читающим, чем по номеру в списке. На примерах поясним в деталях эту идею.

3. Применение структурированных мультидокументов.

3.1. Документы в базе данных MySQL (сосредоточенный подход). На рисунке 4 иллюстрируется использование entry-элементов для рассмотренного ранее примера (рисунок 2).

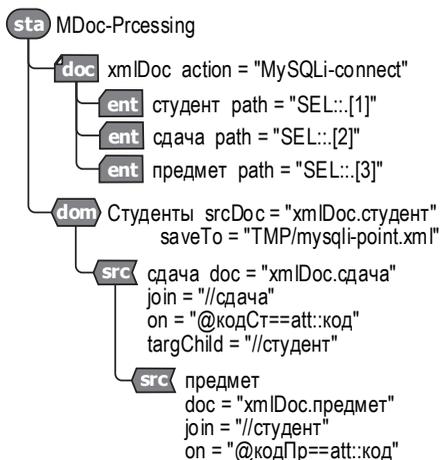


Рис. 4. Entry-элементы при сосредоточенном отображении на базу данных MySQL

Здесь виртуальный мультидокумент `doc:xmlDoc` с помощью атрибута `action` задает соединение с базой данных `hsm` сервера MySQL. Он содержит три дочерних entry-элемента, специфицирующих запросы

выборки из базы данных XML-документов: `ent:студент` — документа со сведениями о студентах; `ent:сдача` — со сведениями о сдачах; `ent:предмет` — со сведениями о предметах. Соответственно, источники данных `dom`-элемента `dom:студенты` ссылаются на эти `entry`-элементы: "`xmlDoc.студент`", "`xmlDoc.сдача`", "`xmlDoc.предмет`" (используется «точечная» нотация: имя `doc`-элемента — точка — имя `entry`-элемента). В процессе обработки источников данных HSM-интерпретатор по ссылкам обращается к спецификациям `entry`-элемента и генерирует SQL-запросы выборки для извлечения соответствующих документов из поля `doc` первой, второй и третьей строк таблицы `xmldocs`:

```
SELECT doc FROM xmldocs WHERE id = 1;  
SELECT doc FROM xmldocs WHERE id = 2;  
SELECT doc FROM xmldocs WHERE id = 3.
```

В рассматриваемом примере используется краткий синтаксис спецификации запросов [18]; допустимо указывать SQL-запросы непосредственно в атрибутах `path` `entry`-элементов. Атрибут `saveTo` обеспечивает сохранение контента DOM-объекта в файле `tmp/mysql-point.xml` после завершения обработки элемента `dom:студенты`.

3.2 Документы в базе данных MySQL (распределенный подход). «Распределенный» подход к отображению на базу данных [19] предполагает, что контент виртуального XML-документа поэлементно (а не целым документом) хранится в ячейках таблиц реляционной базы данных. В этом случае XML-документ при загрузке собирается «на лету» (*on the fly*) из результатов запроса выборки, а при сохранении, наоборот, «разбирается» и размещается в базе.

На рисунке 5 для рассмотренного ранее примера (рисунок 2) иллюстрируется этот случай. В этом примере предполагается, что в базе данных `hsm` имеются три таблицы: `студент`, `предмет`, `сдача`, строки которых содержат данные о студентах, о предметах и о сдачах соответственно (рисунок 5a). Из этих таблиц «на лету» должны формироваться «плоские» те же XML-документы (рисунок 5b), которые в предыдущем примере хранились целиком в ячейках таблицы `xmldocs` (рисунок 2a-c). Чтобы обеспечить такое распределенное отображение, `entry`-элементы в атрибутах `path` содержат спецификации, во-первых, запросов выборки данных, во-вторых, метода преобразования реляционных данных в формат XML. На этой основе этих спецификаций интерпретатор ситуационной модели генерирует SQL-запросы выборки:

```
SELECT * FROM студент;  
SELECT * FROM сдача;  
SELECT * FROM предмет.
```

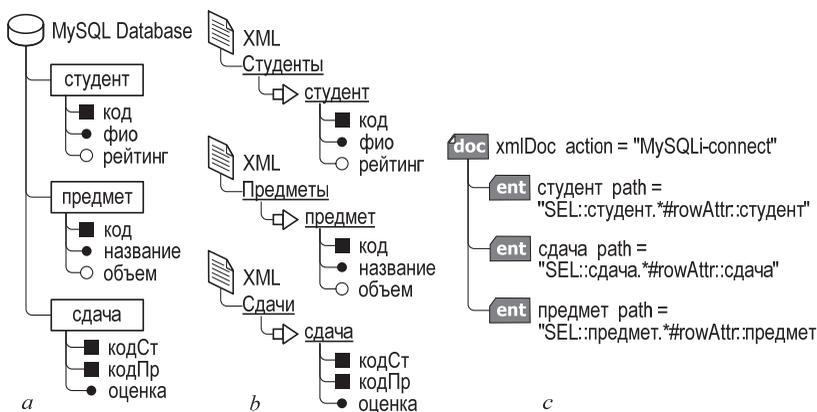


Рис. 5. Entry-элементы при распределенном отображении на базу MySQL: *a* – модели таблиц, на которые отображается виртуальный документ; *b* – модели «плоских» XML-документов, формируемых при выборке из базы; *c* – HSM-модель ВМД с распределенным отображением

При этом опция `rowAttr` в спецификациях предписывает сформировать «плоский» атрибутоцентричный XML-документ, в котором каждая строка результата выборки представляется в виде XML-элемента с заданным именем, а поля результата — в виде одноименных XML-атрибутов. Фрагмент ситуационной модели `dom:Студенты`, обеспечивающий загрузку и обработку виртуального документа, остается неизменным (рисунки 4).

3.3. Документы в архиве. Рассмотрим случай, когда XML-документы физически хранятся в zip-архиве (рисунок 6).

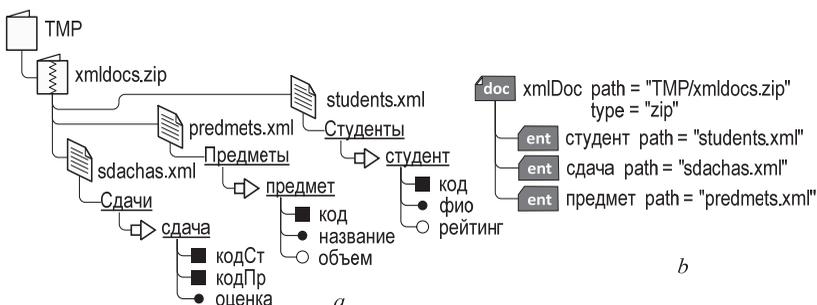


Рис. 6. Entry-элементы при отображении на zip-архив: *a* – модель содержимого архива; *b* – HSM-модель виртуального мультидокумента

Пусть XML-файлы `students.xml`, `predmets.xml`, `sdachas.xml` со сведениями о студентах, о предметах и о сдачах упакованы в архиве

xml-docs.zip, находящемся в директории TMP (рисунок 6а). В этом случае определение виртуального мультидокумента doc:xmlDoc будет иметь вид, представленный на рисунке 6б. Здесь атрибут type = "zip" указывает на то, что виртуальный документ отображается на XML-файлы в zip-архиве. Атрибут path в doc-элементе задает адрес размещения архива в целом, а в entry-элементах — адрес документа внутри архива. Как и в предшествующем примере фрагмент dom:Студенты, обеспечивающий загрузку и обработку виртуального документа, остается неизменным (рисунок 4).

3.4. Документы в XML-файлах. Рассмотрим самый простой случай, когда документы хранятся в виде XML-файлов в каталоге файловой системы. Пусть XML-файлы students.xml, predmets.xml, sdachas.xml со сведениями о студентах, о предметах и о сдачах находятся в директории TMP файловой системы (рисунок 7а). В этом случае определение виртуального мультидокумента doc:xmlDoc будет иметь вид, показанный на рисунке 6б. Отсутствие указаний на базу данных или zip-архив (атрибуты action или type) означает, что по умолчанию виртуальный документ отображается на XML-файлы в файловой системе. Атрибут path в doc-элементе задает общий префикс адреса документов, а в entry-элементах — относительный адрес конкретного документа. Как и в предшествующих примерах фрагмент dom:Студенты, обеспечивающий загрузку и обработку виртуального документа, остается неизменным (рисунок 4).

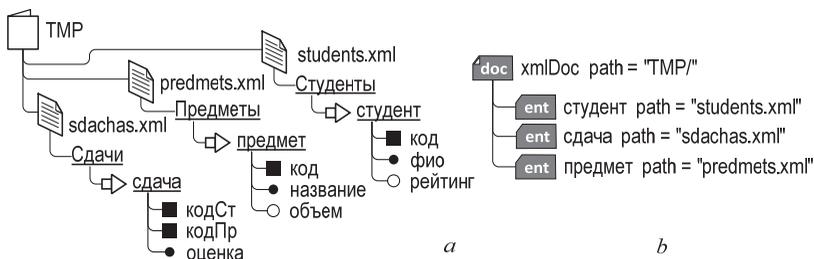


Рис. 7. Entry-элементы при отображении на каталог файловой системы: *a* – модель содержимого директории TMP; *b* – HSM-модель виртуального мультидокумента

3.5. Принцип инвариантности. Рассмотренные выше примеры различаются лишь способом физического хранения XML-документов. При этом HSM-модели различаются только в плане определения ВМД в doc-элементе, в то время как dom-элементы, задающие обработку ВМД, остаются неизменными. Это означает, что соблюдается принцип инвариантности ВМД по отношению к различным видам отображения на реальные хранилища данных, сформулированный авторами в рабо-

те [20] и состоящий в том, что изменение вида отображения не требует изменения модели в части обработки виртуальных документов.

3.6. Пример отображения на XML-сервисы. В заключение этого раздела рассмотрим пример получения и обработки документов, предоставляемых веб-сервисами XML, приближенный к реальному веб-приложению в плане предоставления данных пользователю и обработки возникающих ошибок (рисунок 8).

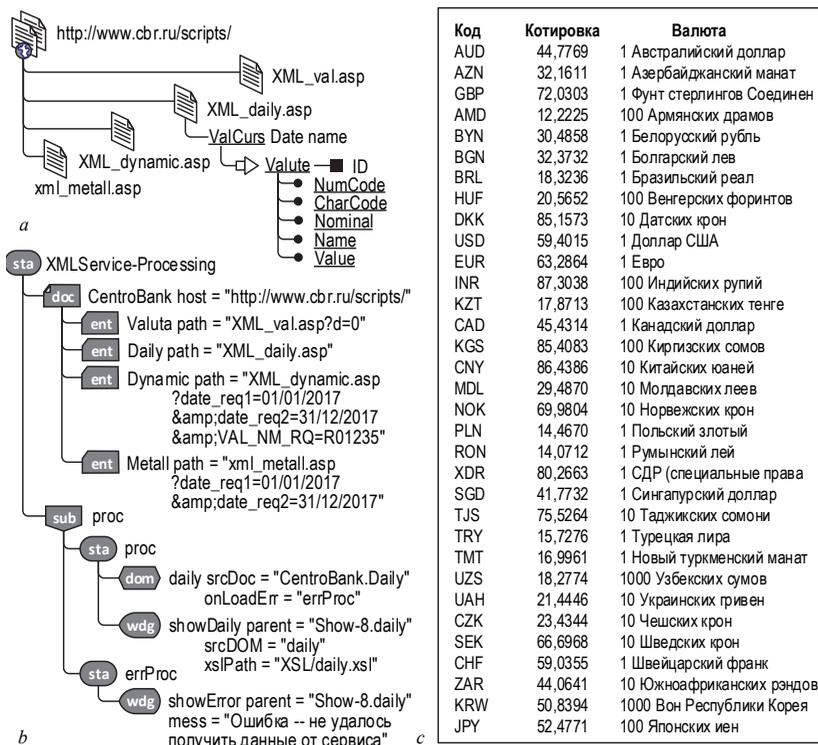


Рис. 8. Entry-элементы при отображении на XML-сервисы: *a* – модель XML-сервисов Центробанка России; *b* – HSM-модель отображения на XML-сервисы и обработки одного из XML-документов; *c* – результат обработки документа, полученного через XML-сервис

На рисунке 8*a* приведена модель некоторых XML-сервисов Центробанка России (<http://www.cbr.ru/scripts/>), предоставляющих соответствующие данные в формате XML (см. пояснения к рисунку 3). Здесь показана структура одного из XML-документов — списка котировок, — генерируемого на веб-странице XML_daily.asp.

Корневой элемент ValCurs содержит два атрибута: Date — дату котировок, и name — название документа. Он включает множество дочерних элементов Valute, соответствующих определенным видам валюты, с атрибутом ID, идентификатором валюты, и дочерними элементами: NumCode — числовой код валюты; CharCode — символьный код валюты; Nominal — номинал; Name — название валюты; Value — цена за номинал в рублях.

HSM-модель sta:XMLService-Processing, представленная на рисунке 8b, содержит определение ВМД doc:CentroBank и субмодель sub:proc, состояния которой sta:proc и sta:errProc обеспечивают обработку одного из документов ВМД. Определение ВМД эквивалентно представленному на рисунке 3, но отдельные документы здесь заданы с помощью поименованных entry-элементов, а общий префикс интернет-адресов веб-страниц вынесен в атрибут host doc-элемента. Такое структурирование определения ВМД хотя и делает его более объемным, повышает понятность и читабельность (ср. с рисунком 3).

Состояние sta:proc предусматривает создание объекта dom:daily и загрузку в него виртуального документа Daily, заданного в ВМД doc:CentroBank. Атрибут onLoadErr задает имя состояния, в которое следует перейти в случае обнаружения ошибки при загрузке DOM-объекта.

Далее в этом состоянии с помощью виджет-элемента wdg:showDaily формируется изображение для пользователя путем XSL-трансформации содержимого DOM-объекта: XML-документ, загруженный в DOM-объект, заданный атрибутом srcDOM, трансформируется в HTML-код в соответствии с таблицей стилей (stylesheet), заданной атрибутом xslPath. Результат трансформации иллюстрируется на рисунке 8c: содержимое XML-документа представлено в виде таблицы, каждая строка которой соответствует валюте, в колонку «Код» выведено значение элемента CharCode, в колонку «Котировка» — элемента Value, а в колонку «Валюта» — сцепления элементов Nominal и Name. Атрибут parent задает родительский виджет и адрес в нем для встраивания HTML-кода изображения, сформированного данным виджет-элементом.

В состоянии sta:errProc формируется сообщение об ошибке с помощью виджет-элемента wdg:showError; текст сообщения задается атрибутом mess.

4. Реализация и эффективность подхода.

4.1. Общие принципы реализации. Предложенная выше функциональность виртуальных мультидокументов реализована в исследовательском прототипе HSM-интерпретатора на платформе PHP в составе «движка» для управления веб-приложениями на основе СОБД. Исследовательский прототип HSM-интерпретатора, написанный на

языке PHP, а также тестовые HSM-модели и другие программы и данные веб-приложений размещены на веб-сервере <http://hsm.ugatu.su/>. При обращении клиента к корневому скрипту веб-приложения запускается HSM-интерпретатор, который выполняет цикл интерпретации соответствующей HSM-модели, в ходе которого корректируется соответствующая CSM-модель и формируется результирующий HTML-код, отправляемый клиенту.

Функционирование HSM-интерпретатора при обработке ВМД с отображением на различные форматы реальных данных основано на применении встроенных PHP-модулей взаимодействия с внешними данными: файлами, базами данных, архивами, веб-сервисами и т. п. Для внутренней обработки данных применяется взаимодействие через глобальные ассоциативные массивы. В соответствии с этим подходом при обработке ситуационной модели для каждого виртуального документа, заданного в состоянии, являющемся текущим на данном цикле интерпретации, в оперативной памяти интерпретатором создается одноименный глобальный массив, в который помещаются параметры и объекты, необходимые для доступа к реальным документам. При дальнейшей обработке источников и приемников данных, ссылающихся на виртуальный документ, интерпретатор обращается к соответствующему глобальному массиву, получая тем самым сведения, необходимые для доступа к реальным документам. Ошибки, обнаруженные при обработке виртуальных документов, также отражаются в глобальном массиве — массиве ошибок, наличие которого позволяет программировать реакцию на ошибки — изменять текущее состояние, оповещать пользователя об ошибке и так далее.

4.2. Доступ к программному коду. Все упомянутые выше ситуационные модели, представленные в статье в графическом виде (рисунки 2-8), были запрограммированы, отлажены и протестированы на исследовательском прототипе HSM-интерпретатора, чем была подтверждена их работоспособность. Для удобства читателей HSM-код моделей, содержимое тестовых и других файлов, используемых при тестировании, представлены на сайте проекта ситуационно-ориентированных баз данных по адресу: <http://hsm.ugatu.su/codesamples/> (для доступа в левом меню КАТЕГОРИИ выбрать пункт ВИРТУАЛЬНЫЕ ДОКУМЕНТЫ и подпункт [Мультидокументы entry]); далее выбрать пункт, соответствующий интересующей модели). Примеры работают в реальном времени: при выборе примера на сервере запускается соответствующий тест и результаты отображаются пользователю.

4.3. Эффект от применения предлагаемого подхода. Состоит в снижении трудоемкости программирования веб-приложения, построенного на основе СОБД по сравнению с традиционным «ручным»

программированием на языках серверных сценариев, таких как PHP. Это достигается за счет более высокого уровня абстракции HSM-модели, когда множество рутинных операций, необходимых для реализации функций, указанных в декларативной форме в определениях виртуальных мультидокументов, возлагается на интерпретатор HSM-модели. Это такие операции, как установление соединения с реальным хранилищем данных, преобразование реальных данных в XML-формат, загрузка, обработка и выгрузка данных. Проведенные авторами расчеты свидетельствуют, что это позволяет сократить объем программного кода (по сравнению с «ручным» PHP-программированием) в части, необходимой для обработки виртуальных XML-документов, до 15 раз, что дает пятикратное сокращение общего объема кода HSM-модели (для рассмотренных примеров).

5. Заключение. Виртуальный мультидокумент позволяет обрабатывать в ситуационно-ориентированных базах данных множество XML-данных, реально хранящихся в различных средах: в файловой системе, в реляционной базе данных, в zip-архивах и других.

Предложено структурированное описание виртуальных мультидокументов, при котором мультидокумент в целом задается с помощью doc-элемента, а составляющие его виртуальные документы — с помощью дочерних entry-элементов. При этом ссылка на мультидокумент происходит по имени doc-элемента, а на отдельный виртуальный документ — по имени entry-элемента, квалифицированном именем родительского doc-элемента.

Техника применения предложенного подхода проиллюстрирована для различных случаев отображения виртуальных XML-данных на реальные хранилища: на ячейку MySQL-таблицы при «сосредоточенном» отображении; на множество ячеек MySQL-таблиц при «распределенном» отображении; на zip-архив; на директорию файловой системы; на удаленные XML-сервисы.

Предложенный подход делает понятнее описание громоздких виртуальных мультидокументов и обеспечивает их инвариантность по отношению к различным видам отображения на реальные хранилища данных (изменение отображения не требует изменения модели в части обработки данных).

Литература

1. *Delgado A., Marotta A., González L.* Towards the construction of quality-aware Web Warehouses with BPMN 2.0 Business Processes // IEEE Eighth International Conference on Research Challenges in Information Science (RCIS'2014). 2014. pp. 1–6.
2. *Delgado A., Marotta A.* Automating the process of building flexible Web Warehouses with BPM Systems // Computing Conference IEEE Press Latin American (CLEI'2015). 2015. pp. 1–11.

3. *Богачева А.Н. и др.* Опыт применения картографических сервисов для отображения географических данных из БД НИКА // Труды Института системного анализа Российской академии наук. 2016. Т.66. № 3. С. 45–54.
4. *Кейно П.П., Силуянов А.В.* Разработка и внедрение интерпретатора декларативного языка моделирования Web-интерфейсов на высоконагруженных системах // Прикладная информатика. 2015. № 1(55). С. 55–70.
5. *Pinheiro P.V.P., Endo A.T., Simao A.* Model-Based Testing of RESTful Web Services Using UML Protocol State Machines // Brazilian Workshop on Systematic and Automated Software Testing. 2013. pp. 1–10.
6. *Agustin J.L.H., Del Barco P.C.* A model-driven approach to develop high performance web applications // Journal of Systems and Software. 2013. vol. 86. no. 12. pp. 3013–3023.
7. *Daniel F., Matera M.* Model-Driven Software Development // Mashups. Springer. 2014. pp. 71–93.
8. *Djukic V., Lukovic I., Popovic A., Ivancevic V.* Model Execution: An Approach based on extending Domain-Specific Modeling with Action Reports // Computer Science and Information Systems. 2013. vol. 10. no. 4. pp. 1585–1620.
9. *Aguilar J.A. et al.* An Analysis of Techniques and Tools for Requirements Elicitation in Model-Driven Web Engineering Methods // Computational Science and Its Applications (ICCSA'2015). 2015. pp. 518–527.
10. *Pokorny J.* NoSQL databases: a step to database scalability in web environment // International Journal of Web Information Systems. 2013. vol. 9. no. 1. pp. 69–82.
11. *Bugiotti F., Cabibbo L., Atzeni P., Torlone R.* Database design for NoSQL systems // Conceptual Modeling. 2014. pp. 223–231.
12. *Janga P., Davis K.C.* Mapping heterogeneous XML document collections to relational databases // International Conference on Conceptual Modeling. 2014. LNCS 8824. pp. 86–99.
13. *Taranov I. et al.* Sedna: Native XML database management system (internals overview) // Proceedings of the ACM SIGMOD International Conf. on Management of Data. 2010. pp. 1037–1045.
14. *Zhang S.* Application of document-oriented NoSQL database technology in web-based software project documents management system // IEEE International Conference on Information Science and Technology (ICIST'2013). 2013. pp. 504–507.
15. *Redmond E., Wilson J.R.* Seven Databases in Seven Weeks. A Guide to Modern Databases and the NoSQL Movement // The Pragmatic Bookshelf. 2012. 354 p.
16. *Fowler M., Sadalage P.J.* NoSQL Distilled: A Brief Guide to the Emerging World of Polyglot Persistence // Addison-Wesley. 2013. 192 p.
17. *Mironov V.V., Gusarenko A.S., Yusupova N.I.* Situation-oriented databases: Document management on the base of embedded dynamic model // CEUR Workshop Proceedings (CEUR-WS.org): Selected Papers of the XI International Scientific-Practical Conference Modern Information Technologies and IT-Education (SITITO'2016). Moscow: Russia. 2016. vol. 1761. pp. 238–247.
18. *Миронов В.В., Гусаренко А.С., Юсупова Н.И.* Ситуационно-ориентированные базы данных: интеграция XML-данных с реляционной средой MySQL // Системы управления и информационные технологии. 2016. Т. 65. № 3. С. 48–55.
19. *Миронов В.В., Гусаренко А.С., Юсупова Н.И.* Отображение виртуальных XML-документов на таблицы MySQL в ситуационно-ориентированных базах данных: «распределенный» подход // Информационные технологии и вычислительные системы. 2017. № 1. С. 77–89.
20. *Миронов В.В., Гусаренко А.С., Юсупова Н.И.* Инвариантность виртуальных данных в ситуационно-ориентированной базе данных при отображении на разнородные хранилища // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2017. № 1(151). С. 29–36.

Мионов Валерий Викторович — д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры автоматизированных систем управления, ФГБОУ ВО Уфимский государственный авиационный технический университет (УГАТУ). Область научных интересов: базы данных, веб-программирование, иерархические модели, ситуационное управление. Число научных публикаций — 50. mironov@list.ru, <http://hsm.ugatu.su>; ул. К. Маркса, 12, Уфа, 450008; р.т.: +7(347)273-78-23.

Гусаренко Артем Сергеевич — к-т техн. наук, старший преподаватель кафедры автоматизированных систем управления, ФГБОУ ВО Уфимский государственный авиационный технический университет (УГАТУ). Область научных интересов: базы данных, веб-программирование, ситуационно-ориентированные базы данных. Число научных публикаций — 25. artyomgusarenko@gmail.com, <http://hsm.ugatu.su>; ул. К. Маркса, 12, Уфа, 450008; р.т.: +7(347)273-78-23.

Юсупова Нафиса Исламовна — д-р техн. наук, профессор, декан факультета информатики и робототехники, ФГБОУ ВО Уфимский государственный авиационный технический университет (УГАТУ). Область научных интересов: ситуационное управление и искусственный интеллект в технических и социальных системах. Число научных публикаций — 135. yussupova@ugatu.ac.ru, <http://hsm.ugatu.su>; ул. К. Маркса, 12, Уфа, 450008; р.т.: +7(347)273-78-23.

Поддержка исследований. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-07-00239 А).

V.V. MIRONOV, A.S. GUSARENKO, N.I. YUSUPOVA
**STRUCTURING VIRTUAL MULTI-DOCUMENTS IN
 SITUATIONALLY-ORIENTED DATABASES BY MEANS OF
 ENTRY-ELEMENTS**

Mironov V.V., Gusarenko A.S., Yusupova N.I. Structuring Virtual Multi-Documents in Situationally-Oriented Databases by Means of Entry-Elements.

Abstract. This article presents situation-oriented databases (SODB) and an approach to processing documents in applications based on the hierarchical situational model. SODB at this stage is the repository of the documents and part of the NoSQL databases direction. The storage is mapped on heterogeneous documents and processed in the context of the current situation.

In this regard, it is required to simplify the queries and set them in an intelligible form for the virtual array of documents (VAD). This offers a structured description of documents sets by means of special parts of the model called entry-elements. All entry-elements have a unique name and semantic carry part of the model; they can also be used in other parts of the model. Due to the use of entry-elements the principle of invariance is observed, including when a change mapping does not influence the part of the virtual document processing model. Structuring of virtual multi-documents in SODB by using entry-elements is done on PHP-platform at the SODB project website where code examples are available.

Keywords: situation-oriented database; web-application; model-driven approach; hierarchical situation model; virtual document; relational data; data integration; HSM; NoSQL; XML; DOM; MySQL; PHP.

Mironov Valeriy Viktorovich — Ph.D., Dr. Sci., professor, professor of automated control systems department, Ufa State Aviation Technical University (USATU). Research interests: databases, web development, hierarchical modelling, situation management. The number of publications — 50. mironov@list.ru, <http://hsm.ugatu.su>; 12, Karl Marks street, Ufa, 450008, Russia; office phone: +7(347)273-78-23.

Gusarenko Artem Sergeevich — Ph.D., senior lecturer of automated control systems department, Ufa State Aviation Technical University (USATU). Research interests: databases, web-development, situation-oriented databases. The number of publications — 25. artyomgusarenko@gmail.com, <http://hsm.ugatu.su>; 12, Karl Marks street, Ufa, 450008, Russia; office phone: +7(347)273-78-23.

Yusupova Nafisa Islamovna — Ph.D., Dr. Sci., professor, dean of computer science and robotics faculty, Ufa State Aviation Technical University (USATU). Research interests: hierarchical models of situational management in technical and social systems. The number of publications — 135. yusupova@ugatu.ac.ru, <http://hsm.ugatu.su>; 12, Karl Marks street, Ufa, 450008, Russia; office phone: +7(347)273-78-23.

Acknowledgements. This research is supported by RFBR (grant 16-07-00239 A).

References

1. Delgado A., Marotta A., González L. Towards the construction of quality-aware Web Warehouses with BPMN 2.0 Business Processes. IEEE Eighth International Conference on Research Challenges in Information Science (RCIS'2014). 2014. pp. 1–6.
2. Delgado A., Marotta A. Automating the process of building flexible Web Warehouses with BPM Systems. Computing Conference IEEE Press Latin American (CLEI'2015). 2015. pp. 1–11.

3. Bogacheva A.N. et al. [Experience in the use of map services to display geographic data from the database NIKA]. *Trudy instituta sistemnogo analiza rossijskoj akademii nauk – Proceedings of the Institute of Systems Analysis, Russian Academy of Sciences*. 2016. vol. 66. no. 3. pp. 45–54. (In Russ.).
4. Kejno P.P., Silujanov A.V. [Design and implementation of a declarative web-interface modeling language interpreter on a high-performance distributed systems]. *Prikladnaja informatika – Applied Informatics*. 2015. vol. 1 (55). pp. 55–70. (In Russ.).
5. Pinheiro P.V.P., Endo A.T., Simao A. Model-Based Testing of RESTful Web Services Using UML Protocol State Machines. Brazilian Workshop on Systematic and Automated Software Testing. 2013. pp. 1–10.
6. Agustin J.L.H., Del Barco P.C. A model-driven approach to develop high performance web applications. *Journal of Systems and Software*. 2013. vol. 86. no. 12. pp. 3013–3023.
7. Daniel F., Matera M. Model-Driven Software Development. Mashups. Springer. 2014. pp. 71–93.
8. Djukic V., Lukovic I., Popovic A., Ivancevic V. Model Execution: An Approach based on extending Domain-Specific Modeling with Action Reports. *Computer Science and Information Systems*. 2013. vol. 10. no. 4. pp. 1585–1620.
9. Aguilar J.A. et al. An Analysis of Techniques and Tools for Requirements Elicitation in Model-Driven Web Engineering Methods. Computational Science and Its Applications (ICCSA'2015). 2015. pp. 518–527.
10. Pokorny J. NoSQL databases: a step to database scalability in web environment. *International Journal of Web Information Systems*. 2013. vol. 9. no. 1. pp. 69–82.
11. Bugiotti, F., Cabibbo, L., Atzeni, P., Torlone, R. Database design for NoSQL systems. *Conceptual Modeling*. 2014. pp. 223–231.
12. Janga P., Davis K.C. Mapping heterogeneous XML document collections to relational databases. International Conference on Conceptual Modeling. 2014. vol. 8824. pp. 86–99.
13. Taranov I. Shecheklein I., Kalinin A., i dr. Sedna: Native XML database management system (internals overview). Proceedings of the ACM SIGMOD international conference on management of data. 2010. pp. 1037–1045.
14. Zhang S. Application of document-oriented NoSQL database technology in web-based software project documents management system. IEEE International Conference on Information Science and Technology (ICIST'2013). 2013. pp. 504–507.
15. Redmond E., Wilson J.R. Seven Databases in Seven Weeks. A Guide to Modern Databases and the NoSQL Movement. The Pragmatic Bookshelf. 2012. 354 p.
16. Fowler M., Sadalage P.J. NoSQL Distilled: A Brief Guide to the Emerging World of Polyglot Persistence. Addison-Wesley. 2013. 192 p.
17. Mironov V.V., Gusarenko A.S., Yusupova N.I. [Situation-oriented databases: Document management on the base of embedded dynamic model]. CEUR Workshop Proceedings (CEUR-WS.org): Selected Papers of the XI International Scientific-Practical Conference Modern Information Technologies and IT-Education (SITITO'2016). Moscow: Russia. 2016. vol. 1761. pp. 238–247.
18. Mironov V.V., Gusarenko A.S., Yusupova N.I. [Situation-oriented database: integration of XML data and relational environment]. *Sistemy upravlenija i informacionnye tehnologii – Control Systems and Information Technology*. 2016. vol. 65. no. 3. pp. 48–55. (In Russ.).
19. Mironov V.V., Gusarenko A.S., Yusupova N.I. [Displaying virtual XML-documents on MySQL tables in the situation-oriented databases, "distributed" approach]. *Informacionnye tehnologii i vychislitel'nye sistemy – Information technology and computer systems*. 2017. vol. 1. pp. 77–89. (In Russ.).
20. Mironov V.V., Gusarenko A.S., Yusupova N.I. [The invariance of the virtual data in the situationally oriented database when displayed on heterogeneous data storages]. *Vestnik komp'juternyh i informacionnyh tehnologij – Herald of Computer and Information Technologies*. 2017. vol. 1(151). pp. 29–36. (In Russ.).

Signed to print 25.07.2017

Printed in Publishing center GUAP, 67, B. Morskaya, St. Petersburg, 190000, Russia

The journal is registered in Russian Federal Agency for Communications
and Mass-Media Supervision, certificate ПИ № ФС77-41695 dated August 19, 2010 г.
Subscription Index П5513, Russian Post Catalog

Подписано к печати 25.07.2017. Формат 60×90 1/16. Усл. печ. л. 14,2. Заказ № 271.

Тираж 150 экз., цена свободная

Отпечатано в Редакционно-издательском центре ГУАП, 190000, Санкт-Петербург, Б. Морская, д. 67

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи
и массовых коммуникаций,
свидетельство ПИ № ФС77-41695 от 19 августа 2010 г.

Подписной индекс П5513 по каталогу «Почта России»