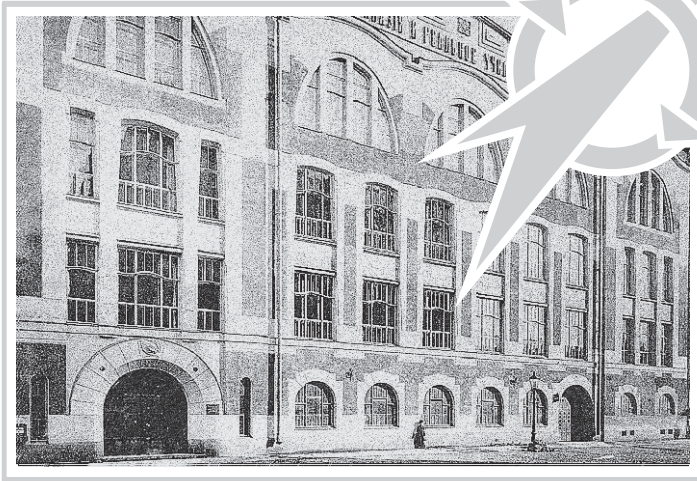


РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
Отделение нанотехнологий и информационных технологий

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ИНСТИТУТ ИНФОРМАТИКИ И АВТОМАТИЗАЦИИ РАН

ТРУДЫ СПИИРАН

proceedings.spiiras.nw.ru



ВЫПУСК 2(45)



Санкт-Петербург
2016

18+

Труды СПИИРАН

Выпуск № 2(45), 2016

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, д-р техн. наук, профессор, член-корреспондент РАН, 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, член-корр. 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 РАО, д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

В.А. Сойфер, член-корр. 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

Н.В. Хованов, д-р физ.-мат. наук, проф., С.-Петербург, РФ

Л.Б. Шереметов, д-р техн. наук, Мехико, Мексика

А.В. Язенин, д-р техн. наук, профессор, Тверь, РФ

Адрес редакции

199178, Санкт-Петербург, 14-я линия, д. 39,

e-mail: publ@iias.spb.su, сайт: <http://www.proceedings.spiiras.nw.ru/>

Подписано к печати 04.04.2016. Формат 60×90 1/16. Усл. печ. л. 14,2. Заказ № 112. 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 29393 по каталогу «Почта России»

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, 2015

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»

SPIIRAS Proceedings

Issue № 2(45), 2016

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

Trudy SPIIRAN ♦ Founded in 2002 ♦ Труды СПИИРАН

Founder and Publisher

Federal State Budget Institution of Science

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

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., Corr. Member 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. Merkuriev, 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., Corr. Member 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., Corr. Member 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
N.V. Hovanov, Prof., Dr. Sci., St. Petersburg,
Russia
L.B. Sheremetov, Assoc. Prof., Dr. Sci., Mexico,
Mexico
A.V. Yazenin, Prof., Dr. Sci. Tver, Russia

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/>

Signed to print 04.04.2016

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 r.

Subscription Index 29393, Russian Post Catalog

© Federal State Budget Institution of Science

St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, 2015

СОДЕРЖАНИЕ

Методы управления и обработки информации

Васильев С.Н., Локтев М.А., Толоч А.В., Толоч Н.Б., Ульянов С.А. К ПЛАНИРОВАНИЮ МАРШРУТОВ В 3D-СРЕДЕ С МНОВАРИАНТНОЙ МОДЕЛЬЮ	5
Визильтер Ю.В., Вишняков Б.В., Выголов О.В., Горбацевич В.С., Князь В.А. ТЕХНОЛОГИИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ ЗАДАЧ НАВИГАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫМИ ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ	26
Лазарев В.С., Агаджанов Д.Э. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ТРАЕКТОРИИ ГРУППЫ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ В ДВУМЕРНОЙ СРЕДЕ	45
Мусаев А.А., Сердюков Ю.П. СООТНОШЕНИЕ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ СИГНАЛОВ КАК КРИТЕРИЙ ОЦЕНКИ ФИЗИЧЕСКОЙ СКОРОСТИ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ	58
Батенков К.А. СИНТЕЗ ДЕТЕРМИНИРОВАННЫХ НЕЛИНЕЙНЫХ ДИСКРЕТНЫХ ОТОБРАЖЕНИЙ НЕПРЕРЫВНЫХ КАНАЛОВ СВЯЗИ	75

Средства вычислительной техники и систем управления

Бубнов В.П., Сергеев С.А. НЕСТАЦИОНАРНЫЕ МОДЕЛИ ЛОКАЛЬНОГО СЕРВЕРА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ИСКУССТВЕННЫХ СООРУЖЕНИЙ	102
Архипкин А.В., Комченков В.И., Корольков Д.Н., Петров В.Ф., С.Б. Симонов, Терентьев А.И. ЗАДАЧИ ГРУППОВОГО УПРАВЛЕНИЯ РОБОТАМИ В РОБОТОТЕХНИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ ПОЖАРОТУШЕНИЯ	116
Клоков А.В., Юрченко В.И., Шипилов С.Э., Якубов В.П. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ РОБОТОВ НА ОСНОВЕ РАДИОВИДЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФОКУСИРУЮЩИХ ЛИНЗ ЛЮНЕБЕРГА	130
Васильев А.В., Кондратьев А.С., Градовцев А.А., Даляев И.Ю. ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ПРОЕКТНОГО ОБЛИКА МОБИЛЬНОЙ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ РАЗВЕДКИ НА ПОВЕРХНОСТИ ЛУНЫ	141
Дворников О.В., Прокопенко Н.Н., Бутырлагин Н.В., Бугакова А.В. ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ НОВЫХ МИКРОСХЕМ БАЗОВОГО МАТРИЧНОГО И БАЗОВОГО СТРУКТУРНОГО КРИСТАЛЛОВ В ДАТЧИКОВЫХ СИСТЕМАХ	157
Прокопенко Н.Н., Чернов Н.И., Югай В. Ю. СИНТЕЗ К-ЗНАЧНЫХ ЦИФРОВЫХ IP-МОДУЛЕЙ ДЛЯ РОБОТОВ И ДАТЧИКОВЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ЛИНЕЙНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ ТОКОВЫХ ЛОГИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ	172

Алгоритмы и программные средства

Отческий С.А., Бурдинский И.Н. АЛГОРИТМ ПОСТТРИАНГУЛЯЦИОННОЙ КОРРЕКЦИИ КООРДИНАТ АВТОНОМНОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА	190
---	-----

Информационная безопасность

Браницкий А.А., Котенко И.В. АНАЛИЗ И КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ ОБНАРУЖЕНИЯ СЕТЕВЫХ АТАК	207
---	-----

CONTENTS

Methods of Information Processing and Management

Vassilyev S.N., Loktev M.A., Tolok A.V., Tolok N.B., Ulyanov S.A. ROUTE PLANNING IN 3D ENVIRONMENT WITH A MULTIVARIANT MODEL	5
Vizilter Yu.V., Vishnyakov B.V., Vygolov O.V., Gorbatshevich V.S., Knyaz V.A. INTELLIGENT DATA PROCESSING TECHNOLOGIES FOR UNMANNED AERIAL VEHICLES NAVIGATION AND CONTROL	26
Lazarev V.S., Agadjanov D.E. USING GRAPHIC-ANALYTICAL METHODS FOR ROBOTS GROUP MOVEMENT TRAJECTORIES FORMATION IN THE TWO-DIMENSIONAL ENVIRONMENT	45
Musaev A.A., Serdyukov Yu.P. THE UNCERTAINTY RELATION BETWEEN THE SIGNALS AS A CRITERION FOR EVALUATION OF PHYSICAL DATA RATE	58
Batenkov K.A. SYNTHESIS OF DETERMINISTIC NONLINEAR DISCRETE MAPPINGS OF CONTINUOUS COMMUNICATION CHANNELS	75

Means of Computer Facilities and Control Systems

Bubnov V.P., Sergeev S.A. NON-STATIONARY MODELS OF A LOCAL SERVER OF THE AUTOMATED SYSTEM FOR MONITORING ARTIFICIAL STRUCTURES	102
Arkhipkin A.V., Komchenkov V.I., Korolov D.N., Petrov V.F., Simonov S.B., Terentev A.I. PROBLEMS OF GROUP CONTROL OF ROBOTS IN THE ROBOTIC COMPLEX OF FIRE EXTINGUISHING	116
Klokov A.V., Yurchenko V.I., Shipilov S.E., Yakubov V.P. DEVELOPMENT OF A TECHNICAL VISION SYSTEM FOR ROBOTS BASED ON RADIO- WAVE IMAGING USING A LUNEBURG FOCUSING LENS	130
Vasiliev A.V., Kondratyev A.S., Gradovtsev A.A., Dalyaev I.Yu. RESEARCH AND DEVELOPMENT OF DESIGN SHAPE OF MOBILE ROBOTIC SYSTEM FOR GEOLOGICAL EXPLORATION ON THE MOON'S SURFACE	141
Dvornikov O.V., Prokopenko N.N., Butyrlagin N.V., Bugakova A.V. PERSPECTIVES OF APPLICATION OF NEW CHIPS OF ANALOG MASTER SLICE ARRAY AND CONFIGURABLE STRUCTURED ARRAY OF CRYSTALS IN SENSOR SYSTEMS	157
Prokopenko N.N., Chernov N.I., Yugay V.Y. SYNTHESIS OF K-VALUED DIGITAL IP-MODULES FOR ROBOTS AND SENSOR SYSTEMS BASED ON LINEAR TRANSFORMATIONS OF CURRENT LOGIC SIGNALS	172

Algorithms and Software

Otcheskii S.A., Burdinsky I.N. THE POST TRIANGULATION ALGORITHM FOR COORDINATE CORRECTION OF AN AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE	190
---	-----

Information Security

Branitskiy A.A., Kotenko I.V. ANALYSIS AND CLASSIFICATION OF METHODS FOR NETWORK ATTACK DETECTION	207
--	-----

С.Н. ВАСИЛЬЕВ, М.А. ЛОКТЕВ, А.В. ТОЛОК, Н.Б. ТОЛОК, С.А. УЛЬЯНОВ К ПЛАНИРОВАНИЮ МАРШРУТОВ В 3D-СРЕДЕ С МНОГОВАРИАНТНОЙ МОДЕЛЬЮ

Васильев С.Н., Локтев М.А., Толок А.В., Толок Н.Б., Ульянов С.А. **К планированию маршрутов в 3D-среде с многовариантной моделью.**

Аннотация. В данной статье излагаются результаты исследований по планированию маршрутов автономных подвижных объектов на априорно сформированной многовариантной модели маршрута (МММ) как множестве альтернативных путей из начальной точки в целевую. Построение МММ основывается на компьютерном методе функционально-воксельного моделирования, сочетающем аналитическую форму описания 3D-сцены с воксельным представлением ее локальных геометрических характеристик. Синтез управления движением и стабилизация траектории движения обеспечиваются представлением объекта управления в форме многорежимной модели и применением к ней метода редукции.

Ключевые слова: Многовариантная модель маршрута, R-функциональное моделирование, функционально-воксельное моделирование, метод редукции.

Vassilyev S.N., Loktev M.A., Tolok A.V., Tolok N.B., Ulyanov S.A. **Route Planning in 3d Environment with Multivariant Model.**

Abstract. We present results of the research on the planning of routes of unmanned vehicles (autonomous moving objects). The routing is based on the multivariant route model (MRM) formed a priori as a set of alternative paths from an initial point to the target. The MRM construction is done using the computer method of functional voxel modeling, combining the analytical form of describing a 3D-environment with the voxel representation of its local geometrical characteristics. Synthesis of the motion control and stabilization of the path trajectory are done by representing the control object as a multimode model and applying the reduction method to it.

Keywords: Multivariate route model, R-function modeling, functional voxel modeling, reduction method.

1. Введение. Планирование автономным подвижным объектом (АПО) своего маршрута движения относится к задачам интеллектуального управления, т.е. управления с заданной целью и автоматическим отысканием способа ее достижения методами искусственного интеллекта [1]. Существует целый ряд приложений, где маршрутизация в реальном масштабе времени базируется на динамическом мониторинге ситуации (траектория движения роботов [2], автономное функционирование беспилотных летательных аппаратов [3], трассировка движения роем [4] и т.п.). Решение таких задач может осуществляться разными методами: например, с применением генетических алгоритмов, нейросетей или логических выводов. При формировании возможных вариантов маршрутов могут использоваться символичные описания событий, но, как правило, не обходится без работы с геометрическими объектами. Даже в известной 3D-среде на маршруте движения робота могут возникнуть препятствия, но планирование их об-

хода существенно упрощается благодаря априорному построению множества альтернативных путей из начальной точки в целевую и последующего выбора участков этих путей для прокладки маршрута с динамически возникающими помехами.

Среди многообразия существующих алгоритмов, базирующихся на аналитическом описании с геометрической постановкой можно выделить применение метода потенциальных функций [5-7], основанного на расчете влияния потенциальных сил двух типов: силы притяжения к цели и силы отталкивания от границ препятствия [8]. В результате формируется рельеф функции, по которому допустимый путь определяется движением по градиенту. К достоинству такого алгоритма можно отнести достаточную гладкость получаемой кривой движения. Однако результат работы алгоритма во многом зависит от способа задания функции, определяемой потенциалами. Некорректный выбор функции приводит к остановке алгоритма при попадании градиентного спуска в неучтенную локальную потенциальную яму [9].

Использование метода функционально-воксельного моделирования (ФВМ) [10, 11] позволяет предложить новый подход к геометрическому решению задачи определения вариантов маршрутов с заданными препятствиями.

Термин «voxel» («воксель») был изначально введен в развитие понятия «pixel» как объемная единица экрана перспективных трехмерных дисплеев. Впоследствии этот термин стал применяться для обозначения внутреннего формата поточечного компьютерного графического представления объектов. Несмотря на довольно долгую историю существования самого термина, применение вокселей в разработке систем компьютерного проектирования и управления сегодня только набирает обороты. В частности, интересна применимость ФВМ в задачах оптимизации [12, 13].

Основой ФВМ является принцип организации данных, сочетающий аналитическую форму описания модели 3D-сцены с воксельным представлением ее локальных геометрических характеристик. Принцип аналитического описания 3D-сцены базируется на построении замкнутых плоских контуров-препятствий, приведенных к общей поверхности так называемого повышенного пространства, т.е. пространства с увеличенной на единицу размерностью [14]. Такой подход позволяет получать для исследования дифференциальные и интегральные характеристики в точках функциональной области, что представляет интерес при решении различных задач математического моделирования, сводимых к геометрической постановке [15, 16]. В качестве способа аналитического описания среды используется математический

аппарат R-функций [17]. Объединяющим контуром, определяющим конечные точки маршрута, является эллипс, сформированный на основе фокусных точек. Результат функционально-воксельного моделирования 3D-сцены является дифференциальной основой для исследования формы полученной поверхности повышенного пространства [18].

В рассматриваемых здесь задачах с перепрокладкой маршрута модель АПО становится многорежимной в силу необходимости изменения программной траектории в моменты обнаружения препятствий. Адекватным описанием многорежимных систем управления являются системы с переменной структурой управления [19, 20], а в случае переменной структуры самого объекта управления — системы с переключениями или гибридные системы, активно изучаемые в последнее время [21]. Синтез управления АПО сводится к использованию сублинейных аналогов функции Ляпунова [22, 23].

2. Аналитическое описание 3D-сцены для получения вариантов трасс. Рассмотрим основные принципы построения 3D-среды на основе аналитического описания контуров-препятствий и объединяющего эллиптического контура с применением логических операций R-функций. Выберем формулу описания эллипса как основу построения трассы. Каноническое уравнение эллипса со смещенным центром в точке $O(x_0, y_0)$ (рисунок 1):

$$\frac{(x-x_0)^2}{a^2} + \frac{(y-y_0)^2}{b^2} = 1, \quad (1)$$

где a и b — большая и малая полуоси эллипса. Первым недостатком такого задания является необходимость организации поворота в случае негоризонтального положения конечных точек пути, что приводит к рассмотрению уже общего канонического вида кривой второго порядка (рисунок 2).

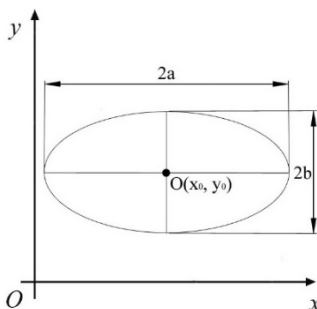


Рис. 1. Представление канонического уравнения эллипса

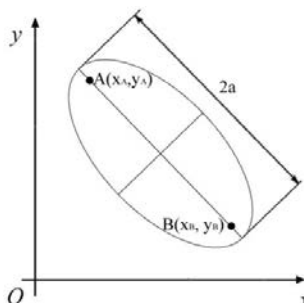


Рис. 2. Представление уравнения эллипса по заданным фокусам

Принцип описания функции в повышенном пространстве (ФПП), который совпадает с описанием предикатов в теории R-функций [17], позволяет получить 3D-поверхность для функции эллипса, где нулевой уровень высотных значений w распределен по кривой эллипса (рисунок 3):

$$w = 1 - \frac{(x-x_0)^2}{a^2} - \frac{(y-y_0)^2}{b^2}, \quad (2)$$

здесь w — трехмерная поверхность, пересекающая нулевую отметку на границе заданного эллипса.

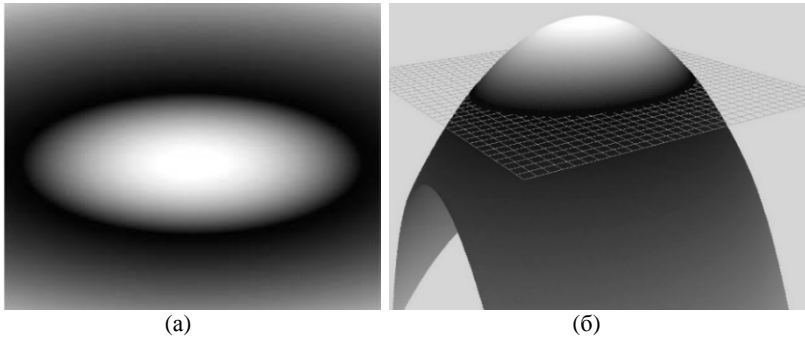


Рис. 3. Графические модели поверхности ФПП для канонического уравнения конуса: (а) 2D; (б) 3D

Как видно из рисунка 3, полученная поверхность ФПП по форме не отвечает поставленным условиям выделения фокусных точек, а сходится к единственной точке в середине эллипса.

Для функционального представления ФПП с учетом рельефного выделения конечных точек и исходного маршрута более подходящим является уравнение эллипса, выраженное через точки фокуса $A(x_A, y_A)$ и $B(x_B, y_B)$:

$$\sqrt{(x-x_A)^2 + (y-y_A)^2} + \sqrt{(x-x_B)^2 + (y-y_B)^2} = 2a,$$

тогда ФПП примет вид (рисунок 4):

$$w_i = \sqrt{(x-x_A)^2 + (y-y_A)^2} + \sqrt{(x-x_B)^2 + (y-y_B)^2} - 2a, \quad (3)$$

где a — большая полуось эллипса.

Представление эллипса (3) имеет ряд преимуществ по сравнению с представлением (2) для описания 3D-сцены. Во-первых, способ

задания эллипса двумя точками фокусов (рисунок 2) привязан к заданию крайних точек пути $A(x_A, y_A)$ и $B(x_B, y_B)$, что позволяет сразу однозначно задавать пространственное положение эллипса относительно этих точек. При этом величина (a) устанавливается в зависимости от определенного, заранее заданного охвата препятствий 3D-сцены.

Поскольку в основу способа построения маршрутов положено изучение рельефных проявлений на построенной поверхности ФПП, то вторым преимуществом является форма поверхности ФПП для представления (3), которая имеет рельеф, отвечающий поставленным требованиям. На рисунке 4 наблюдается ярко выраженный хребет, проходящий между *точками-фокусами* $A(x_A, y_A)$ и $B(x_B, y_B)$ и задающий беспрепятственный маршрут.

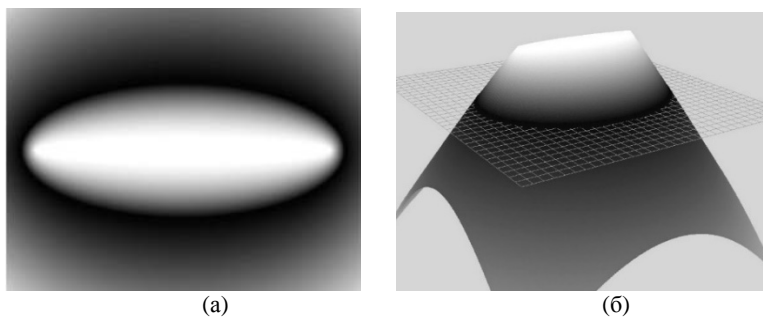


Рис. 4. Воксельная модель фокусного уравнения конуса: (а) 2,5D; (б) 3D

Построим функционально-воксельную модель 3D-сцены. Для вычисления локальных геометрических характеристик рельефа линейно аппроксимируем поверхность функции w_1 , где каждой точке пространства сцены соответствует уравнение плоскости $A_i x + B_i y + C_i w + D_i t = 0$. Повысив размерность нормали к площадке на одно измерение, получим уравнение $A_i x + B_i y + C_i w + D_i t = 0$. В результате имеем четыре локальных геометрических характеристик, т.е. компоненты нормали (A_i, B_i, C_i, D_i) для каждой из точек функциональной области w_1 .

Воксельное представление ФВМ-модели предполагает монохромное отображение для каждой локальной характеристики, которую можно представить нормированием и приведением в соответствие значению градации цветовой палитры P . Например, целочисленные значения палитры цвета в точках функциональной области, соответствующие значениям компоненты нормали по оси Ox , определяются формулой:

$$C_x = \left(\frac{A}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2 + D^2}} + 1 \right) \cdot P / 2, \quad (4)$$

где P – градация интенсивности тона палитры.

На рисунке 5 приводится раскладка 3D-сцены на образы C_x , C_y , C_w , C_t . Как видно, образы компонентов нормали не позволяют однозначно представить хребет, а лишь зрительно выделяют его конечные *точки-фокусы* эллипса в качестве экстремальных точек поверхности функции. Но совокупность таких образов способна порождать дополнительные образы, которые уже позволяют автоматизировать рельефную оценку поверхности. Рассмотрим возможность порождения образа C_x как результат двухкомпонентного нормирования вектора нормали в плоскости xOy :

$$C_x = \left(\frac{A}{\sqrt{A^2 + B^2}} + 1 \right) \cdot P / 2. \quad (5)$$

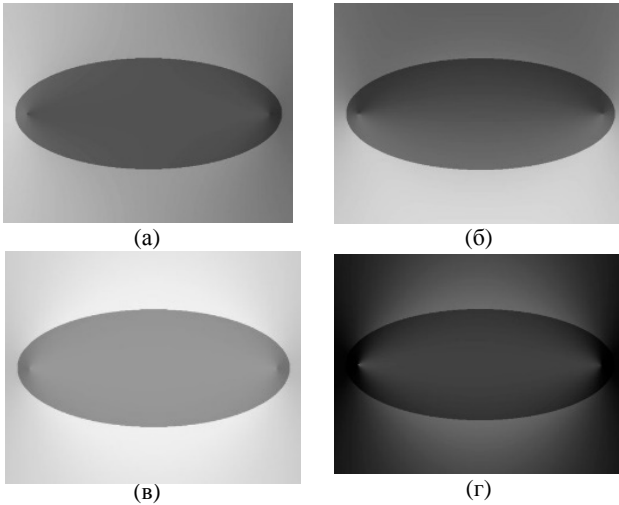


Рис. 5. Воксельные образы компонентов: (а) C_x , (б) C_y , (в) C_w , (г) C_t

Полученный образ (рисунок б) наглядно отображает излом рельефа поверхности функции, представленный в виде цветового контраста на уровне точек хребта между точками фокусов, т.е. по ходу применения алгоритма компьютерной обработки изображения вырабатывается признак особых точек, проявляющих хребет или ложину на рельефе поверхности. Именно способ формирования хребтов и ложин,

обходящих возникающие препятствия, положен в основу описания ФПП области для определения вариантов маршрутов.

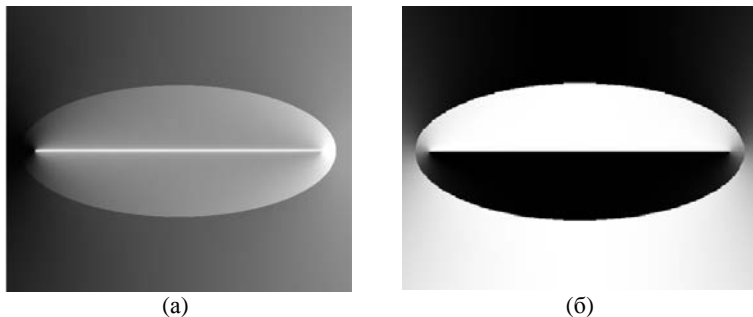


Рис. 6. Порожденный двухкомпонентный графический образ поверхности эллипса: (а) C_x , (б) C_y

3. Моделирование контуров-препятствий для 3D-сцены. Добавим препятствия на пути заданных точек A и B . В качестве примера построения контура препятствия выберем четырехугольник с одним острым углом. Рассмотрим получение плавного обхода препятствий. В [17] R -функциональное представление плоской многоугольной области Ω , ограниченной выпуклым n -угольником, предлагается представлять суперпозицией элементарных функций составленных из уравнения прямой, проходящей через две точки:

$$\Omega = \Sigma_1 \cap \Sigma_2 \cap \dots \cap \Sigma_i \cap \dots \cap \Sigma_n, \quad (6)$$

где $\Sigma = x(y_1 - y_2) - y(x_1 - x_2) + (x_1 y_2 - y_1 x_2)$.

Аналогичный способ R -функционального описания сложных многоугольных контуров был применен в [24], а принципы автоматизации вычисления аналитического выражения любого сложного контура рассмотрены в [25]. Область ФПП прямоугольника w_2 объединим с областью рассмотренного ранее ФПП эллипса w_1 , применив математический аппарат R -функций:

$$w_{12} = \frac{1}{\alpha + 1} (w_1 + w_2 + \sqrt{w_1^2 + w_2^2 - 2\alpha w_1 w_2}), \quad (7)$$

где $0 < \alpha \leq 1$ — параметр, влияющий на кривизну поверхности функции.

В результате R -функционального объединения получены графические образы C_x и C_y для поверхности функции w_{12} (рисунок 7), характеризующие компоненты нормали на осях Ox и Oy . Наложение

рельефных свойств обеих областей w_1 и w_2 приводит к образованию новых «хребтов» и «лощин» в области w_{12} , определяющих направления маршрутов.

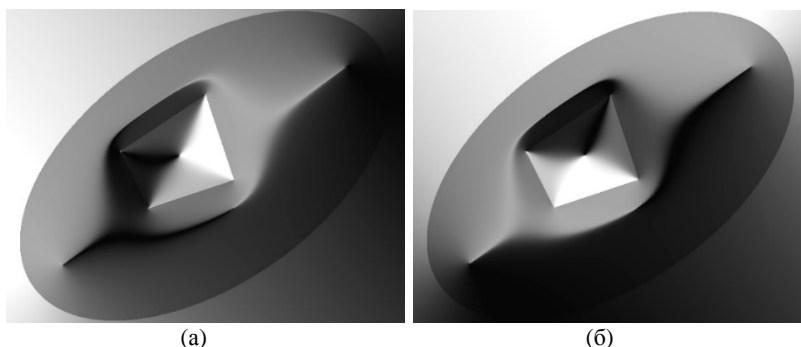


Рис. 7. Образы C_x и C_y для поверхности функции w_{12}

Дальнейшие шаги алгоритма построения маршрутов заключаются в распознавании точек рельефных проявлений на поверхности функции w_{12} . С помощью определения цветового контраста для каждого образа выделяются границы участков маршрута, а сопоставление таких участков при наложении образов позволяет выявить участки, не принадлежащие маршруту, и отфильтровать их. В результате однозначно получаем два маршрута обхода препятствия (рисунок 8). Как видно, оба маршрута, в отличие от огибаемого ими препятствия, не имеют острых углов, что особенно важно при решении задачи построения маршрута.

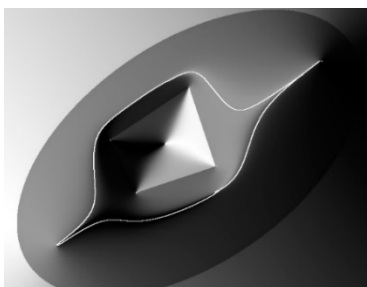


Рис. 8. Выделение основных огибающих трасс и их наложение на образ C_x

Интерес представляет коэффициент α в формуле (4), влияющий на кривизну обхода препятствий. Для построения образа на рисунке 8 использовалось значение $\alpha = 0$, при котором система R -функций приобретает частный вид и выражается формулой:

$$w_{12} = w_1 + w_2 + \sqrt{w_1^2 + w_2^2}. \quad (8)$$

Из-за квадратичного закона R -функции коэффициент $\alpha = 0$ формирует графические образы с наиболее монотонным поведением ФПП, а трассы становятся максимально сглаженными. При увеличении значения α , кривизна трасс уменьшается, что наблюдается при сопоставлении рисунков 9а и 9б.

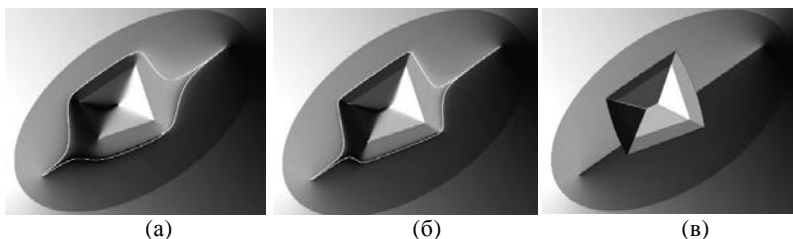


Рис. 9. Варьирование кривизны трассы при: а) $\alpha = 0.5$, б) $\alpha = 0.9$, в) $\alpha = 1$

Отдельное внимание заслуживает частный случай при $\alpha = 1$ (рисунок 9в). Рельеф такой функции сопоставим с модульной формулировкой:

$$w_{12} = \frac{1}{2}(w_1 + w_2 + |w_1 - w_2|). \quad (9)$$

При таком графическом образе для формы трасс характерно максимальное приближение к форме самого препятствия, из-за чего зачастую не обеспечивается плавность обхода, однако опорные точки такой траектории удобно использовать при построении рисунка графа [26], с последующим применением алгоритмов поиска кратчайшего пути [27]. Рельеф поверхности функции на графическом образе (рисунок 9в) формирует скелет общего контура описания сцены, широко применимый при анализе его формы и ко многим другим прикладным задачам [28, 29].

4. Многовариантное определение маршрутов. Усложним задачу. Рассмотрим случай обхода нескольких препятствий. Для этого аналогично предыдущему шагу на сцене добавим еще два аналитически описанных контура четырехугольной формы. В результате R -функционального объединения поверхностей, образуемых уже тремя контурами, а затем применения предложенного алгоритма трассировки получаем две трассы, огибающие все препятствия лишь с двух сторон (рисунок 10). В этом случае становится очевидным, что полученное решение не является единственным и существуют маршруты, проходящие между препятствиями (рисунок 11). Действительно, при

обычном просмотре сложной сцены невозможно распознать все элементы среды. Порой для получения полной информации о рельефе, приходится поворачивать сцену или источник освещения. Для поворота сцены применим известный математический аппарат:

$$\begin{aligned} x' &= x \cos \varphi - y \sin \varphi; \\ y' &= x \sin \varphi + y \cos \varphi, \end{aligned} \quad (10)$$

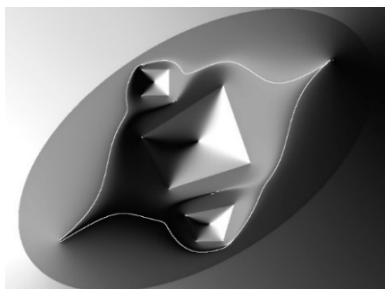


Рис. 10. Трасса, огибающая препятствия

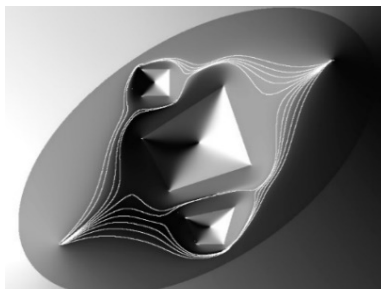


Рис. 11. Маршруты, полученные вариационной трассировкой

При поэтапном повороте сцены (рисунок 12) появляются новые графические образы, контур и форма которых совпадают с исходной функцией до поворота, однако цветовая гамма для локальных геометрических характеристик функции на них разная, поскольку меняются направления возрастания и убывания поверхности.

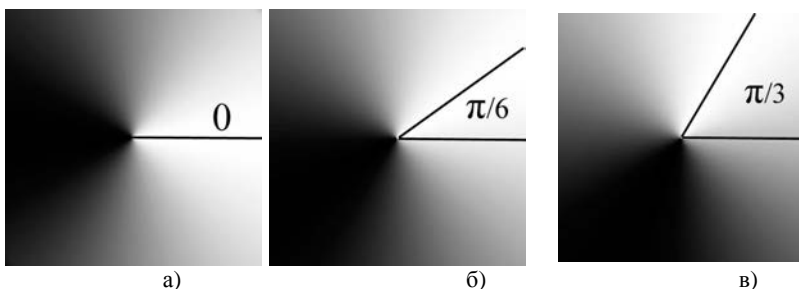


Рис. 12. Организация поворота графического образа C_x

Набор таких графических образов способен дать наиболее подробную информацию о поведении функции. В результате возникают новые варианты прокладки трассы, в том числе между объектами. Многовариантность маршрутов представлена на рисунке 13. Она дополняет модель сцены недостающими маршрутами. Многообразие

маршрутов показывает, в первую очередь, особенности рельефа функции, позволяющего формировать коридоры, в пределах которых могут располагаться варианты маршрутов с учетом препятствий.

5. Организация статических ограничений построения вариантов маршрутов. Немаловажную роль при работе алгоритма маршрутизации играет возможность задания дополнительных параметров "управления" окружающей средой. Например, при моделировании движения манипулятора робота или БПЛА может возникать необходимость в регулировании уровня опасности приближения к отдельным объектам.

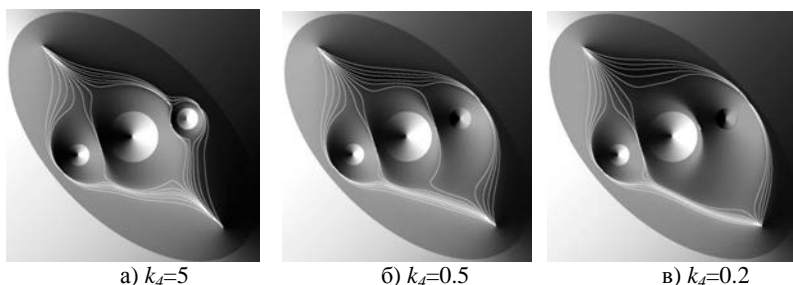


Рис. 13. Управление опасностью отдельных элементов

На рисунке 13а демонстрируется изменение геометрии трасс при увеличении в 5 раз коэффициента $k_4=5$, умножаемого на функцию, описывающую правое препятствие w_4 . Это влияет на распределение выходящих маршрутов таким образом, что к препятствию w_4 направляется большая их часть. Таким образом, увеличивается количество маршрутов в направлении более безопасного препятствия w_4 . В противоположном случае при уменьшении коэффициента функции $k_4=0.5$ (рисунок 13б), маршруты имеют тенденцию отдаления от неблагоприятного участка. При значительном уменьшении коэффициента $k_4=0.2$ и менее (рисунок 13в), результирующие трассы максимально обходят стороной нежелательный объект.

6. Учет динамически возникающих препятствий. Как уже отмечалось, выбранный по каким-либо критериям маршрут движения из точки A в точку B на практике не всегда может оказаться реализуемым на оставшемся участке маршрута. Допускаются случаи внешних возмущений в 3D-сцене в форме непредвиденных, но статических препятствий движению, вызывающих необходимость пересмотра дальнейшего маршрута. Избыточность в МММ заложена для выбора альтернативного варианта движения в обход возникшего препятствия.

Аналитическое представление возникающих (новых) препятствий должно быть простым с точки зрения производительности прокладки дальнейшего маршрута. Примером представления препятствия

может являться цилиндрическое тело единичного радиуса $p = I - (x - x_i)^2 - (y - y_i)^2$, где (x_i, y_i) — координаты центра источника помехи, а значение p определяет интенсивность влияния помехи на текущее состояние движения по маршруту. При этом каждая точка на оставшемся участке маршрута приобретает свое значение p . Вводимые помехи, хотя и имеют аналитическое описание, не включаются в общую структуру функционально-воксельной модели и представляют самостоятельное множество объектов 3D-сцены.

При прокладке маршрута методом ФВМ формирование помех моделируется появлением препятствия на маршруте движения в случайные моменты времени. Коррекция программной траектории движения и наделение ее свойством асимптотической устойчивости и другими желаемыми динамическими свойствами обеспечивается позиционным управлением по алгоритмам из [23, 30], где описаны алгоритмы синтеза управления, стабилизирующего движение по маршруту, и показано, что эта технология применима и к групповому управлению движением. В развитие [31] желаемые динамические свойства обеспечиваются достаточными условиями метода редукции в терминах сублинейных вектор-функций Ляпунова (СВФЛ) [32, 33] типа “модуль линейных форм” (векторная норма). Выполнена программная реализация метода. Приводятся примеры [34, 35].

Кроме того, в развитие [33-35], разработан общий метод получения условий редукции, более алгоритмичный и в ряде случаев существенно ослабляющий эти условия.

Покажем, как для конкретного АПО обеспечивается движение по сгенерированному методом ФВМ маршруту. Пусть движение АПО на плоскости описывается системой:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= v \cos \varphi, & \dot{y} &= v \sin \varphi, & \dot{\varphi} &= \omega, \\ m\dot{v} &= u, & J\dot{\omega} &= u^\varphi, \end{aligned}$$

где x, y — координаты центра масс АПО в некоторой неподвижной декартовой системе координат, v — скорость (абсолютная) центра масс, φ — угол между направлением вектора скорости и осью Ox (курс), ω — угловая скорость; m — масса, J — момент инерции относительно вертикальной оси; u, u^φ — линейное и угловое управления (тяга и момент).

Определим виртуальный подвижный объект как точку O на построенном пути, движение которой необходимо отслеживать. Пусть заданы законы движения виртуального объекта $x_o(t)$ и $y_o(t)$. Для наглядности будем считать, что виртуальный объект движется с постоянной линейной скоростью v_d . Тогда алгоритм управления

реального объекта, отслеживающего движение виртуального, можно определить как:

$$\begin{bmatrix} u(t) \\ u^\varphi(t) \end{bmatrix} = K [x_e(t) \quad y_e(t) \quad \phi_e(t) \quad v_e(t)]^T,$$

где $x_e(t) \equiv x(t) - x_o(t)$, $y_e(t) \equiv y(t) - y_o(t)$, $\phi_e(t) \equiv \phi(t) - \phi_o(t)$, $v_e(t) \equiv v(t) - v_d$, $\phi_o(t)$ — угол между касательной к траектории в точке $(x_o(t), y_o(t))$ и осью Ox , K — матрица параметров алгоритма управления.

Для синтеза параметров управления используется технология построения СВФЛ из [36, 37]. Она предполагает, что возмущенное движение исследуемой системы (вместе с наблюдателями состояния и возмущений, динамикой регулятора и элементов системы управления) описывается дифференциальными уравнениями вида:

$$\begin{aligned} (J + \Delta J(t, x))\dot{x} &= (A + \Delta A(t, x))x + (B + \Delta B(t, x))u + \\ &+ GF(t, x, u) + H\Phi(t, x, u), \end{aligned} \quad (11)$$

$$u = \varphi(\cdot, \sigma) \in R^m, \quad \sigma = C\psi(\cdot, \eta) \in R^m, \quad \eta = Dx \in R^l, \quad x = x(t), \quad x \in R^n. \quad (12)$$

Здесь $\Delta J(\cdot)$, $\Delta A(\cdot)$, $\Delta B(\cdot)$, $F(\cdot)$, $\Phi(\cdot)$ — функции, задающие неопределенности и нелинейности объекта, внешние и другие возмущения, для которых предполагаются известными лишь ограничения $|J^{-1}\Delta J(\cdot)| \leq J^0$, $|\Delta A(\cdot)| \leq A^0$, $|\Delta B(\cdot)| \leq B^0$, $|F(\cdot)| \leq U(|\theta|) \in R^p$, $\theta = \Theta x \in R^q$, $|\Phi(\cdot)| \leq \Phi^0 \in R^r$ (неравенства между матрицами (векторами), модули понимаются как поэлементные); $J, A, B, G, H, C, D, J^0, A^0, B^0, \Theta, \Phi^0$ — постоянные матрицы и векторы соответствующих размерностей; U — неубывающая, полунепрерывная сверху функция, $U(0) = 0$. Функции $\varphi(\cdot)$, $\psi(\cdot)$ задают характеристики исполнительных органов и измерителей с учетом их нелинейностей, погрешностей, неопределенности, нестабильности, ограниченности сигналов (и др.) и считаются функциями класса SN [36, 37], содержащего многие типовые нелинейности, нелинейности стандартного или расширенного секторов абсолютной устойчивости и определяемого соотношениями.

$$\begin{aligned} \min\{K_\sigma(\sigma - \sigma^0) - K_\sigma^0|\sigma|; K_\sigma\bar{\sigma}\} \leq \varphi(\cdot, \sigma) \leq \\ \max\{K_\sigma(\sigma + \sigma^0) + K_\sigma^0|\sigma|; -K_\sigma\bar{\sigma}\} \quad (0 \leq \sigma^0 < \bar{\sigma} \leq \infty). \end{aligned}$$

Задача синтеза управления состоит в том, чтобы система (11, 12) была диссипативной при любых допустимых неопределенностях и возмущениях (робастно диссипативной) и в установившемся режиме значения модуля заданного выходного вектора $\gamma_f = \Gamma_f x \in R^{V_f}$ были минимальными, т.е. достигалась наивысшая точность стабилизации.

Строгое решение поставленной задачи не представляется возможным, так как в общем случае не доступны ни точное вычисление значения критерия, ни точная проверка ограничений. В работе развивается подход, в котором вместо точных значений рассматриваемых показателей качества используются их оценки, которые эффективно находятся с помощью ВФЛ. При этом проверка наличия разнообразных требуемых динамических свойств и вычисление оценок основных показателей качества осуществляется путем редукции к аналогичным задачам для квазимонотонной вспомогательной системы. Она определяется построением СВФЛ, что для рассматриваемых систем управления полностью автоматизировано, как и вычисление количественных оценок основных прямых показателей динамического качества (предельной точности стабилизации, областей притяжения, диссипативности, максимальных отклонений и др.).

При синтезе управления учитывались погрешности измерений, неопределенности параметров модели АНО и ограничения на управляющие воздействия.

7. Заключение. Предлагаемый метод построения маршрута АПО на основе ФВМ формирует множество вариантов допустимых маршрутов. При некоторых разумных ограничениях (на разнообразие возможных помех относительно МММ) достижимость цели гарантируется. Метод легко адаптируется под различные виды 3D-среды и помех (сложный рельеф, отдельно стоящие объекты, острова водоемов и т.п.). Обеспечение желаемых динамических свойств АПО осуществимо представлением объекта многорежимной моделью движения и синтезом управления с помощью метода редукции.

Литература

1. *Васильев С.Н., Жерлов А.К., Федосов Е.А., Федунев Б.Е.* Интеллектуальное управление динамическими системами // М.: Физматлит. 2000. 352 с.
2. *Dutta S.* Obstacle Avoidance of Mobile Robot using PSO-based Neuro Fuzzy Technique // International Journal of Computer Science and Engineering. 2010. vol. 2. no. 2. pp. 301–304.
3. *Liu W., Zheng Z., Cai K.* Adaptive path planning for unmanned aerial vehicles based on bi-level programming and variable planning time interval // Chinese Journal of Aeronautics. 2013. vol. 26. no. 3. pp. 646–660.
4. *Cuevas E., Cienfuegos M., Zaldívar D., Perez-Cisneros M.* A swarm optimization algorithm inspired in the behavior of the social-spider // Expert Systems with Applications. 2013. vol. 40. no. 16. pp. 6374–6384.

5. *Гилимьянов Р.Ф., Рапопорт Л.Б.* Метод деформации пути в задачах планирования движения роботов при наличии препятствий // Проблемы управления. 2012. № 1. С.70–76.
6. *Кирильченко А.А., Колганов М. А., А. К. Платонов А. К.* Метод потенциалов в задаче выбора пути: история и перспективы // Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша. 2001. С. 40.
7. *Koren Y., Borenstein J.* Potential field methods and their inherent limitations for mobile robot navigation // Proceedings of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation. 1991. pp. 1398–1404.
8. *Макарычев В.П.* Метод переменных стратегий построения траекторий движения роботов в среде с препятствиями // Искусственный интеллект. 2008. № 3. С. 451–461.
9. *Ткачев С.Б., Виноградова М.С.* Методы поиска допустимых путей для беспилотных летательных аппаратов // Инженерный вестник. 2014. № 12. С. 667–675.
10. *Васильев С.Н., Ковалев С.П., Толок А.В.* Воксельные технологии: состояние и перспективы развития // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2014): сб. научных трудов / Под ред. С.Н. Васильева, А.Д. Цвиркуна. М.: ИПУ РАН. 2014. С. 394–400.
11. *Лоторевич Е.А., Толок А.В.* Разработка геометрических принципов воксельного моделирования // Труды XII Всероссийского совещания по проблемам управления. Москва. 2014. С. 19.
12. *Толок А.В.* Решение 3D-задач математического программирования на основе воксельных M-образов в системе РАНОК // 9-я международная конференция "Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта" (CAD/CAM/PDM–2009). М.: ИПУ РАН. 2009. С. 64–67.
13. *Васильев С.Н., Толок А.В.* Решение оптимизационных задач средствами функционально-воксельного моделирования // Тезисы 15-ой Международной конференции "Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта" (CAD/CAM/PDM–2015). М.: ООО "Аналитика". 2015. С. 111.
14. *Толок А.В.* Графические образы-модели в информационных технологиях // Прикладная информатика. 2009. № 4(22). С. 31–40.
15. *Толок А.В.* Применение воксельных моделей в процессе автоматизации математического моделирования // Автоматика и телемеханика. 2009. № 6. С. 167–180.
16. *Григорьев С.Н., Толок А.В., Силантьев Д.А., Лоторевич Е.А., Пушкарев С.А.* Визуализация математического моделирования при определении рабочих поверхностей детали // Технология машиностроения. 2013. № 2. С. 57–60.
17. *Рвачев В.Л.* Теория R-функций и некоторые ее приложения. Киев: Наук. думка. 1982. 552 с.
18. *Григорьев С.Н., Локтев М.А., Толок А.В.* Построение воксельных моделей геометрических объектов // Прикладная информатика. 2013. № 4(46). С. 50–56.
19. *Емельянов С.В.* Системы автоматического управления с переменной структурой // М.: Наука. 1967. 336 с.
20. *Емельянов С.В., Уткин В.И.* Теория систем с переменной структурой // М.: Наука. 1970. 592 с.
21. *Васильев С.Н., Косов А.А.* Анализ динамики гибридных систем с помощью общих функций Ляпунова и множественных гомоморфизмов // Автоматика и телемеханика. 2011. № 6. С. 27–47.
22. *Матросов В.М.* Метод векторных функций Ляпунова: анализ динамических свойств нелинейных систем // М.: Физматлит. 2001. 384 с.
23. *Васильев С.Н., Козлов Р.И., Ульянов С.А.* Устойчивость многорежимных формаций // Доклады Академии наук. 2014. Т. 455. № 3. С. 269–274.
24. *Shapiro V.* Semi-analytic geometry with R-functions // Acta Numerica. 2007. no. 18(3). pp. 239–303.

25. *Локтев М.А., Толок А.В.* Кусочно-аналитическое представление полигональной модели на основе аппарата R-функций // Математическое моделирование и информатика: труды XV научной конференции. Москва. 2013. С. 147–150.
26. *Курапов С.В., Толок А.В.* Методы построения топологического рисунка графа // Автоматика и телемеханика. 2013. № 9. С. 78–97.
27. *Gubichev A., Bedathur S., Seufert S., Weikum G.* Fast and accurate estimation of shortest paths in large graphs // In ACM Conference on Information and Knowledge Management (CIKM). 2010. pp. 499–508.
28. *Aichholzer O., Aurenhammer F.* Straight Skeletons for General Polygonal Figures in the Plane // Lecture Notes in Computer Science. 1996. Vol. 1090. pp. 117–126.
29. *Palfrader P., Held M., Huber S.* On Computing Straight Skeletons by Means of Kinetic Triangulations // Proc. 20th Annu. Europ. Symp. Algorithms (ESA'12). 2012. pp. 766–777.
30. *Васильев С.Н., Ульянов С.А.* Многорежимное управление движущимися группировками // Труды XII Международной конференции "Проблемы управления и моделирования в сложных системах". Самара: ИПУСС РАН. 2015. С. 10–25.
31. *Матросов В.М.* Метод сравнения в динамике систем // Дифференц. уравнения. 1975. Т. 11. № 3. С. 403–417.
32. *Козлов Р.И.* Теория систем сравнения в методе векторных функций Ляпунова // Новосибирск: Наука. 2001. 137 с.
33. *Васильев С.Н.* Метод редукции и качественный анализ динамических систем // Изв. РАН. Сер. Теория и системы управления. 2006. № 2. С. 5–17.
34. *Васильев С.Н., Дружинин А.Э., Н.Ю.Морозов.* Вывод условий сохранения свойств математических моделей // Доклады Академии Наук. 2015. Т. 465. № 1. С. 14–19.
35. *Васильев С.Н., Дружинин А.Э., Морозов Н.Ю.* К автоматизации вывода теорем редукции // Труды Международной научной конференции "Информационные и компьютерные технологии, моделирование, управление", посвященной 85-летию академика И.В. Прангишвили. ГТУ. 2015. С. 19.
36. *Абдуллин Р.З., Анапольский Л.Ю., Земляков А.С., Козлов Р.И. и др.* Метод векторных функций Ляпунова в теории устойчивости // М.: Наука. 1987. 312 с.
37. *Козлов Р.И., Ульянов С.А.* Синтез робастного управления с использованием сублинейных ВФЛ. // Материалы Конференции "Управление в технических системах". Санкт-Петербург: ЦНИИ Электроприбор. 2010. С. 271–275.

References

1. Vassilyev S.N., Zherlov A.K., Fedosov E.A., Fedunov B.E. *Intellektnoe upravlenie dinamicheskimi sistemami* [Intelligent control of dynamical systems]. Moscow: Phismathlit. 2000. 352 p. (In Russ.).
2. Dutta S. Obstacle Avoidance of Mobile Robot using PSO-based Neuro Fuzzy Technique. *International Journal of Computer Science and Engineering*. 2010. vol. 2. no. 2. pp. 301–304.
3. Liu W., Zheng Z., Cai K. Adaptive path planning for unmanned aerial vehicles based on bilevel programming and variable planning time interval. *Chinese Journal of Aeronautics*. 2013. vol. 26. no. 3. pp. 646–660.
4. Cuevas E., Cienfuegos M., Zaldívar D., Perez-Cisneros M. A swarm optimization algorithm inspired in the behavior of the social-spider. *Expert Systems with Applications*. 2013. vol 40. no. 16. pp. 6374–6384.
5. Gilimyanov R.F., Rapoport L.B. [Path deformation method in robot motion planning problems in the presence of obstacles]. *Problemy upravleniya – Control sciences*. 2012. no. 1. pp. 70–76 (In Russ.).
6. Kirilchenko A.A., Kolganov M.A., Platonov A.K. [Potentials method in the problem of choosing the path: history and prospects]. *Preprinty IPM im. M. V. Keldysha – Working paper, Keldysh Institute of Applied Mathematics*. 2001. pp. 40. (In Russ.).

7. Koren Y., Borenstein J. Potential field methods and their inherent limitations for mobile robot navigation. Proceedings of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation. 1991. pp. 1398–1404.
8. Makarychev V.P. [Method variables strategies of constructing robots trajectories in an environment with obstacles]. *Iskusstvennyy intellect – Artificial Intelligence*. 2008. vol 3. pp. 451–461. (In Russ.).
9. Tkachev S.B., Vinogradove M.S. [Search methods acceptable routes for unmanned aerial vehicles]. *Inzhenernyy vestnik – Engineering bulletin*. 2014. no. 12. pp. 667–675. (In Russ.).
10. Vassilyev S.N., Kovalyov S.P., Tolok A.V. [Voxel technology: state and prospects]. *Upravlenie razvitiem krupnomasshtabnykh sistem (MLSD'2014): sb. nauchnykh trudov – Management of development of large-scale systems (MLSD'2014)*. Ed. by S.N. Vasil'ev, A.D. Cvirkun. Moscow. Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences. 2014. pp. 394–400. (In Russ.).
11. Lotorevich E.A., Tolok A.V. [Development of geometric principles of voxel modeling]. *Trudy XII Vserossiyskogo soveshhanija po problemam upravlenija* [Proceedings of the 12th Russian conference on Control Problems]. Moscow. 2014. (In Russ.).
12. Tolok A.V. [The decision of 3D-mathematical programming problems on the basis of voxel M-images in RANOK system]. *9-ja mezhdunarodnaja konferencija "Sistemy proektirovanija, tehnologicheskaja podgotovki proizvodstva i upravlenija jetapami zhiznennogo cikla promyshlennogo produkta" (CAD/CAM/PDM–2009)* [Proceedings of the 9th Int. Conf. "System design, production planning and control step life cycle of industrial product" (CAD/CAM/PDM–2009)]. Moscow. Institute of Control Sciences of Russian Academy of Science. 2009. pp. 64–67. (In Russ.).
13. Vassilyev S.N., Tolok A.V. [The solution of optimization problems of functional voxel modeling tools]. *Tezisy 15-oi Mezhdunarodnoj konferencii "Sistemy proektirovanija, tehnologicheskaja podgotovki proizvodstva i upravlenija jetapami zhiznennogo cikla promyshlennogo produkta" (CAD/CAM/PDM–2015)* [Proceedings of the 15th Int. Conf. "System design, production planning and control step life cycle of industrial product (CAD/CAM/PDM–2009)"]. Moscow. Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences. 2009. pp. 111–114. (In Russ.).
14. Tolok A.V. [Graphic image-models in information technologies]. *Prikladnaya informatika – Journal of Applied Informatics*. 2009. vol. 9, no. 4, pp. 31–40. (In Russ.).
15. Tolok A.V. [Using voxel models in automation of mathematical modeling]. *Avtomatika i Telemekhanika – Automation and Remote Control*. 2009. no. 6, pp. 167–180. (In Russ.).
16. Grigoriev S.N., Tolok A.V., Silantjev D.A., Lotorevich E.A., Pushkaryov S.A. [Voxel-mathematical modelling at the solution of problems of definition of working surfaces of details]. *Tekhnologiya Mashinostroeniya – Engineering technology*. 2013. vol. 4. no. 2. pp. 57–60. (In Russ.).
17. Rvachev V.L. *Teorija R-funkcij i nekotorye ee prilozhenija* [Theory of R-functions and Some Applications]. Kiev: Naukova Dumka. 1982. 552 p. (In Russ.).
18. Grigoriev S.N., Loktev M.A., Tolok A.V. [Construction of voxel models of geometric objects]. *Prikladnaya informatika – Journal of Applied Informatics*. 2013. vol. 4. pp. 50–56. (In Russ.).
19. Emelyanov S.V. *Sistemy avtomaticheskogo upravlenija s peremennoj strukturoj* [Variable-structure Automatic Control Systems]. Moscow: Nauka. 1967. 336 p. (In Russ.).
20. Emelyanov S.V., Utkin V.I. *Teorija sistem s peremennoj strukturoj* [Theory of Variable-structure Systems]. Moscow: Nauka. 1970. 592 p. (In Russ.).
21. Vassilyev S.N., Kosov A.A. [Analysis of Hybrid Systems by Common Lyapunov Functions and Multiple Homomorphisms]. *Avtomatika i Telemekhanika – Automation and Remote Control*. 2011. no. 6, pp. 27–47. (In Russ.).
22. Matrosov V.M. *Metod vektornykh funkcij Ljapunova: analiz dinamicheskikh svoystv nelinejnykh sistem* [Vector Lyapunov Functions Method: analysis of the dynamic properties of nonlinear systems]. Moscow: Fizmatlit. 2001. 384 p. (In Russ.).

23. Vassilyev S.N., Kozlov R.I., Ulyanov S.A. [Stability of Multimode Formations]. *Doklady Akademii Nauk – Reports of the Academy of Sciences*. 2014. vol. 455. no. 3, pp. 269–274. (In Russ.).
24. Shapiro V. Semi-analytic geometry with R-functions. *Acta Numerica*. 2007. no. 18(3). pp. 239–303.
25. Loktev M.A., Tolok A.V. [Piecewise analytic representation of a polygonal model based on unit R-functions]. *Matematicheskoe modelirovanie i informatika: trudy HV nauchnoj konferencii* [Proceedings of the 15th science conference “Mathematical modeling and Information”]. Moscow. 2013. pp. 147–150. (In Russ.).
26. Kurapov S.V., Tolok A.V. [The topological drawing of a graph: Construction methods]. *Avtomatika i Telemekhanika – Automation and Remote Control*. 2013. no. 9. pp. 78–97. (In Russ.).
27. Gubichev A., Bedathur S., Seufert S., Weikum G. Fast and accurate estimation of shortest paths in large graphs. In ACM Conference on Information and Knowledge Management (CIKM). 2010. pp. 499–508.
28. Aichholzer O., Aurenhammer F. Straight Skeletons for General Polygonal Figures in the Plane. LNCIS 1090. 1996. pp. 117–126.
29. Palfrader P., Held M., Huber S. On Computing Straight Skeletons by Means of Kinetic Triangulations. Proc. 20th Annu. Europ. Symp. Algorithms (ESA’12). 2012. pp. 766–777.
30. Vassilyev S.N., Ulyanov S.A. [Multimode Control of Moving Formation]. *Trudy XII Mezhdunarodnoy konferentsii "Problemy upravleniya i modelirovaniya v slozhnykh sistemah* [Proc. of 12th Int. Conf “Problems of management and simulation of complex systems”]. Samara. 2015. pp. 10–25. (In Russ.).
31. Matrosov V.M. [The comparison method in the system dynamics]. *Differ. Uravneniya – Differential equations*. 1975. vol. 11. no. 5. pp. 403–417. (In Russ.).
32. Kozlov R.I. *Teoriya sistem sravneniya v metode vektornykh funktsiy Ljapunova* [Theory of comparison systems in the vector Lyapunov functions method]. Novosibirsk: Nauka. 2001. 137 p. (In Russ.).
33. Vassilyev S.N. [Reduction Method and Qualitative Analysis of Dynamical Systems]. *Izvestiya RAN: Teoriya i sistemy upravleniya – Journal of Optimization and Control*. 2006. no. 2. pp. 5–17. (In Russ.).
34. Vassilyev S.N., Druzhinin A.E., Morozov N.Yu. [Derivation of Preservation Conditions for Properties of Mathematical Models]. *Doklady Akademii Nauk – Reports of the Academy of Sciences*. 2015. vol. 465. no. 1. pp. 14–19. (In Russ.).
35. Vassilyev S.N., Druzhinin A.E., Morozov N.Yu. [Derivation of Reduction Theorems]. *Trudy Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii "Informatsionnyye i kompyuternyye tehnologii, modelirovanie, upravlenie"* [Proc. of the Int. Scientific Conf. "Information and computer technology, modeling, management"]. 2015. pp. 19–24. (In Russ.).
36. Abdullin R.Z., Anapolskiy L.Yu., Zemlyakov A.S., Kozlov R.I. etc. *Metod vektornykh funktsiy Ljapunova v teorii ustojchivosti* [Vector Lyapunov functions method in stability theory]. Moscow: Nauka. 1987. 312 p. (In Russ.).
37. Kozlov R.I., Ulyanov S.A. [The synthesis of robust control using the sublinear VLF]. *Materialy konferentsii "Upravlenie v tehnikeskikh sistemah"* [Materials of the conference "Control in technical systems"] St. Petersburg: Concern CSRI Elektropribor. 2010. pp. 271–275. (In Russ.).

Васильев Станислав Николаевич — д-р физ.-мат. наук, профессор, академик Российской академии наук, директор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук (ИПУ РАН). Область научных интересов: теория управления, системы управления. Число научных публикаций — 232. vassilyev_sn@mail.ru; ул. Профсоюзная, 65, Москва, 177995; р.т.: 8(495)3348910.

Vassilyev Stanislav Nikolaevich — Ph.D., Dr. Sci., professor, academician of Russian Academy of Sciences, director, V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of the RAS. Research interests: theory of control, control system. The number of publications — 232. vassilyev_sn@mail.ru; 65, Profsoyuznaya street, Moscow, 117997, Russia; office phone: 8(495)3348910.

Локтев Михаил Александрович — старший инженер лаборатории компьютерной графики, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук (ИПУ РАН). Область научных интересов: воксельная компьютерная графика, системы автоматизации проектирования, системы автоматизации управления. Число научных публикаций — 3. m.loktev@stankin.ru; ул. Профсоюзная, 65, Москва, 177995; п.т.: 8-916-8049877.

Loktev Mikhail Aleksandrovich — senior engineer of the computer graphics laboratory, V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of the RAS. Research interests: voxel computer graphics, CAD, control system. The number of publications — 3. m.loktev@stankin.ru; 65, Profsoyuznaya street, Moscow, 117997, Russia; office phone: 8-916-8049877.

Толок Алексей Вячеславович — д-р техн. наук, профессор, заведующий лабораторией компьютерной графики, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук (ИПУ РАН). Область научных интересов: воксельная компьютерная графика, системы автоматизации проектирования, системы автоматизации управления. Число научных публикаций — 154. a.tolok@stankin.ru; ул. Профсоюзная, 65, Москва, 177995; п.т.: 8(916)5381623.

Tolok Aleksey Vyacheslavovich — Ph.D., Dr. Sci., professor, head of the computer graphics laboratory, V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of the RAS. Research interests: voxel computer graphics, CAD, control system. The number of publications — 154. a.tolok@stankin.ru; 65, Profsoyuznaya street, Moscow, 117997, Russia; office phone: 8(916)5381623.

Толок Наталия Борисовна — к-т техн. наук, ведущий инженер лаборатории газогидродинамических средств автоматизации, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук (ИПУ РАН). Область научных интересов: воксельная компьютерная графика, системы автоматизации проектирования. Число научных публикаций — 6. nat_tolok@mail.ru; ул. Профсоюзная, 65, Москва, 177995; п.т.: 7 916 538-16-23.

Tolok Natalya Borisovna — Ph.D., leading engineer of gashydro-dynamic tools for automation laboratory, V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of the RAS. Research interests: voxel computer graphics, CAD, control system. The number of publications — 6. nat_tolok@mail.ru; 65, Profsoyuznaya street, Moscow, 117997, Russia; office phone: 7 916 538-16-23.

Ульянов Сергей Александрович — к-т техн. наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН. Область научных интересов: теория управления, системы управления. Число научных публикаций — 16. sau@icc.ru; ул. Лермонтова, 65, Иркутск, 664033; п.т.: +7 902 171-39-09.

Ulyanov Sergey Alexandrovich — Ph.D., senior researcher, Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory of Siberian Branch of the RAS, (ISDCT SB RAS). Research interests: theory of control, control system. The number of publications — 16. sau@icc.ru; 134, Lermontova street, Irkutsk, 664033, Russia; office phone: +7 902 171-39-09.

РЕФЕРАТ

Васильев С.Н., Локтев М.А., Толок АВ, Толок Н.Б., Ульянов С.А.
К планированию маршрутов в 3d-среде с многовариантной моделью.

Излагаются результаты исследований по планированию маршрутов автономных подвижных объектов. Маршрутизация базируется на априорно сформированной многовариантной модели маршрута (МММ) как множестве альтернативных путей из начальной точки в целевую. Хотя 3D-среда считается известной, допускается появление в разных точках среды непредвиденных препятствий движению, что вызывает необходимость изменения маршрута на остальном участке пути.

Построение 3D-сцены основано на предварительном задании плоскости уровня для движения и нанесения на этой плоскости контуров сечения препятствий. Аналитическое 3D-представление такого контура, задаваемое неравенством $f(x,y) \neq 0$, заполняет пространство сцены значениями функции f , создавая вспомогательную параболоидную поверхность. Значение функции в каждой точке поверхности отражает степень удаления от геометрического центра контура препятствия. Маршрут должен удовлетворять условиям приемлемой удаленности от препятствий. Предлагается маршрутизация на основе использования R-функционального построения общей для всех препятствий поверхности, рельеф которой однозначно определяет искомые маршруты.

Построение МММ основывается на компьютерном методе функционально-воксельного моделирования, сочетающем аналитическую форму описания 3D-сцены с воксельным представлением её локальных геометрических характеристик. Эти характеристики лежат в основе компьютерного построения точек маршрута. Непредвиденные препятствия, возникающие на маршруте движения, учитываются путём использования участков альтернативных маршрутов из МММ. Обход этих и априорных препятствий реализуется изменением программной траектории движения. Синтез управления движением и стабилизация траектории движения обеспечиваются представлением объекта управления в форме многорежимной модели и применением к ней метода редукции.

SUMMARY

Vassilyev S.N., Loktev M.A., Tolok A.V., Tolok N.B., Ulyanov S.A. **Route Planning in 3d Environment with Multivariant Model.**

We present results of the research on the planning of routes of unmanned vehicles (autonomous moving objects). The routing is based on the multivariant route model (MRM) formed a priori as a set of alternative paths from an initial point to the target point. Although the 3D-environment is assumed to be known, the unforeseen obstacles to the motion in different points of the path are allowed which may cause the need to change the rest of the route.

The 3D environment is constructed after specifying the plane of reference for the movement and contouring of obstacle sections on this plane. The analytical 3D-representation of such a contour, specified as $f(x, y) \neq 0$, fills the space of the stage with values of the f function, creating thereby the supporting paraboloidal surface. The function value at each point of the surface corresponds to the distance from the geometrical center of the contour of the obstacle. The route has to satisfy the conditions of the acceptable distance from the obstacles. This paper suggests to do the routing using the R-functional construction of the surface, shared by all obstacles, whose geometry defines unambiguously the required routes.

The MRM construction is done using the computer method of functional voxel modeling, combining the analytical form of describing a 3D-environment with the voxel representation of its local geometrical characteristics. These characteristics form the basis for the computer construction of the points of the route. The unforeseen obstacles in the route are accounted for by using alternative route segments from MRM. The bypassing of these obstacles and the obstacles known a priori is done through the update of the programmed path. Synthesis of the motion control and stabilization of the path trajectory are done by representing the control object as a multimode model and applying the reduction method to it.

Ю.В. Визильтер, Б.В. Вишняков, О.В. Выголов, В.С. Горбачевич,
В.А. Князь

ТЕХНОЛОГИИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ ЗАДАЧ НАВИГАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫМИ ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ

Визильтер Ю.В., Вишняков Б.В., Выголов О.В., Горбачевич В.С., Князь В.А. Технологии интеллектуальной обработки информации для задач навигации и управления беспилотными летательными аппаратами.

Аннотация. Приведены результаты исследований по разработке технологий обработки разносенсорной информации, получаемой бортовой системой машинного зрения, для решения комплекса задач навигации и управления беспилотным летательным аппаратом (БЛА). Проведен анализ предметной области, выделены основные задачи, требующие решения для эффективного выполнения основных функций БЛА. Предложены оригинальные методы комплексирования, основанные на диффузной морфологии, разработаны методики подготовки обучающих выборок и глубокого машинного обучения, обеспечивающие высокое качество распознавания, создана база данных синтезированных изображений для обучения алгоритмов распознавания.

Ключевые слова: Интеллектуальная обработка информации; беспилотные летательные аппараты; машинное зрение; комплексирование разнородной информации; обнаружение и распознавание; прослеживание объектов; глубокое машинное обучение; моделирование.

Knyaz V.A., Vishnyakov B.V., Gorbatsevich V.S., Vizilter Yu.V., Vygolov O.V. Intelligent data processing technologies for unmanned aerial vehicles navigation and control.

Abstract. The paper presents the results of research in the field of the development of technologies for processing heterogeneous information from the unmanned aerial vehicle (UAV) onboard machine vision system with the aim of UAV navigation and control. The main problems of information processing for UAV navigation and control are considered; general tasks to be solved for mission planning and performing are formulated. The key problems of machine vision system are multiband image processing and fusion (both for flight planning and onboard processing), object detection and localization, object tracking, object recognition. Modern methods of object detection, recognition and tracking are analyzed. Advanced techniques and algorithms are compared, and the most effective ones are determined. New original methods are proposed for multiband images fusion based on diffuse morphology. The original methods are developed for deep machine learning, which provide high probabilities of given object detection and recognition. The database of model images for machine learning algorithms is created. The characteristics of the developed algorithms and results of their tests on model and real data are presented.

Keywords: Intelligent data processing; unmanned aerial vehicle; machine vision; data fusion; object detection and recognition; object tracking; deep machine learning; modeling.

1. Введение. Основной целью проводимых исследований является разработка технологий интеллектуальной обработки и комплексирования специализированной информации в обеспечение решения задач навигации и управления беспилотных летательных аппаратов. На данном этапе путем анализа существующих и разработки новых

перспективных интеллектуальных алгоритмов и технологий развиваются методические основы, обеспечивающие достижение поставленной цели исследований.

Предметная область исследований. На рисунке 1 приведена разработанная карта предметной области исследований, включающая взаимосвязанные ключевые технологические элементы, необходимые для обеспечения задач навигации и управления. Главной целевой задачей здесь соответствует центральный элемент — технологический блок «Выполнение задачи БЛА». С ним непосредственно связаны два крупных ключевых технологических блока, необходимых для его функционирования:

- блок обнаружения и распознавания объектов;
- блок формирования информационного обеспечения.

В свою очередь, блок обнаружения и распознавания объектов связан такими ключевыми составляющими как:

- обработка и комплексирование изображений;
- обнаружение объектов;
- сопровождение объектов;
- распознавание объектов.

При этом блоки обнаружения и распознавания объектов сегодня в обязательном порядке связаны со вспомогательной, но крайне важной технологической задачей обучения алгоритмов на реальных и модельных данных. Без такого обучения не могут быть достигнуты высокие показатели качества обнаружения и распознавания целей. А для проведения обучения необходимо осуществлять формирование как базы реальных изображений объектов и фоно-целевой обстановки, так и еще больших (на порядки) объемов реалистично смоделированных обучающих выборок, для чего требует реализовать такие технологические блоки, как:

- моделирование объектов и сцен;
- моделирование сенсорных каналов.

С другой стороны, формирование информационного обеспечения зависит от планируемой миссии БЛА и связано с такими ключевыми источниками априорной информации как:

- база данных моделей объектов;
- геоинформационная база данных.

Следует отметить, что база данных моделей объектов необходима как для формирования полетной информации, так и для моделирования объектов и сцен при обучении алгоритмов обнаружения и распознавания.

Наконец, поскольку используемая при подготовке информационного обеспечения геоинформация требует постоянного обновления,

необходим технологический блок «Актуализация данных», связанный со следующими тремя основными технологическими подзадачами:

- геопривязка изображений земной поверхности;
- поиск отличий на разномоментных изображениях;
- дешифрирование изображений земной поверхности.



Рис. 1. Схема предметной области

Таким образом, на основе анализа предметной области сформулированы ключевые задачи, элементы технологий, методы и алгоритмы, разработке и исследованию которых посвящен настоящий этап работы. Ниже рассматриваются характеристики сформулированных технологических задач и предварительные результаты проведенных исследований и разработок по каждому из соответствующих ключевых направлений.

2. Задача обнаружения и распознавания объектов. Под задачей обнаружения заданных объектов подразумевается задача локализации целевых объектов без распознавания конкретного типа объекта.

Основной целью обнаружения является высокоскоростное формирование конечного списка кандидатов объектов для последующего распознавания типа (класса) объекта.

Алгоритмы (методы) обнаружения объектов можно разделить на два крупных класса: обучаемые (supervised), требующие набора обучающих примеров в виде изображений целевых объектов, и необучаемые (unsupervised).

Необучаемые алгоритмы (методы) основываются на знаниях (предположениях) о характеристиках целевых объектов. Например, объекты искусственного происхождения, в отличие от окружающего фона естественного происхождения (грунт, растительность, вода), имеют среди прочих такие характеристики как: относительно жесткая или полужесткая структура, в пространственном спектре изображения доминируют низкочастотные компоненты и т.д.

Передовые необучаемые методы (SelectiveSearch [1-2], RandomizePrim [3], EdgeBox [4]) не требуют априорных знаний об искомым объектах. Однако качество поиска целевых объектов у таких методов несколько ниже, чем у обучаемых методов.

Обучаемые методы обнаружения объектов в большинстве случаев рассматривают задачу не просто обнаружения, а обнаружения и распознавания целевых объектов. При этом практически все данные методы могут использоваться и для задач поиска объектов, для чего в обучающую выборку включаются объекты всех искомым классов, и метка класса для всех элементов задается одна — «объект».

В настоящее время обучаемые методы обнаружения объектов квазижесткой структуры (человеческие лица, пешеходы, дорожные знаки, автомобили, автомобильные номера и т.п.) развиваются по трем основным направлениям [5]:

- методы на основе бустинга (boosting-based);
- методы на основе глубокого обучения сверточных нейронных сетей (DCNN или CNN);
- методы на основе деформируемых моделей частей (DPM).

Методы бустинга и DCNN обучаются извлекать инвариантные признаки изображения целевого объекта. Методы на основе DPM строятся на признаках, характеризующих деформации объекта.

В таблице 1 приведены оценки качества вышеуказанных семейств методов обнаружения для случая обнаружения лица по четырем показателям [5]:

- усилия, затрачиваемые на подготовку данных для обучения;
- размеры обучающей базы данных;
- время обучения;
- время тестирования.

Таблица 1. Оценка показателей качества обучаемых методов обнаружения

Семейство методов	Метод	Трудоемкость подготовки обучения	Размер обучающей выборки	Время обучения	Время тестирования
boosting-based	Метод простых признаков Хаара	Средняя	Большой	Выше среднего	Реальное время
	Метод многоканального детектирования признаков	Средняя	Большой	Выше среднего	Близко к реальному времени
DPM	Слабо обучаемый	Средняя	Средний	Среднее	Близко к реальному времени
	Сильно обучаемый	Большая	Средний	Среднее	Почти в реальном времени
DCNN		Средняя	Большой	Большое	Близко к реальному времени

Показатели качества различных обучаемых методов обнаружения имеют схожие значения. При подготовке выборки данных (изображений объекта) для обучения достаточно разметить их в виде ограничивающей изображение объекта рамкой или же соблюсти условие, чтобы объект на изображении занимал большую его часть. Подробная разметка деталей целевого объекта необходима для *DPM* с сильным обучением, слабое обучение *DPM* довольствуется ограничивающей объект рамкой.

Для обеспечения робастности алгоритма при деформациях деталей целевого объекта, вариациях ракурса, освещенности, искажений изображений требуются базы данных большого размера. Исключение составляет метод *DPM*, так как деформации учитываются в самом методе, поэтому для него требуется меньшее количество данных для обучения.

Для данных семейств алгоритмов обучение остается вычислительно затратным. Для методов семейства бустинга и *DPM* время обучения зависит от стратегии обучения и размеров обучающей базы данных.

Многослойные сверточные нейронные сети *DCNN* в полной мере реализуют свои возможности только тогда, когда они обучаются на больших объемах баз данных (для небольших баз данных многослойность является избыточной). Несмотря на развитие параллельных и распределенных вычислений обучение *DCNN* требует больших вычислительных ресурсов.

Огромным преимуществом алгоритмов на основе методов бустинга является то, что они работают в реальном времени (или близком к реальному времени, при условии использования НОГ–признаков).

Для обучения многослойных свёрточных нейронных сетей требуется значительное время, что является одним из недостатков на этапе подготовке данных.

Быстродействие алгоритмов обнаружения, основанных на применении многослойных свёрточных нейронных сетей, в настоящее время является узким местом, ограничивающим его применение в задачах обнаружения целевых объектов. Близкого к реальному времени можно достичь, если локализовать применение *DCNN* областью предполагаемого нахождения объекта.

3. Задача обучения алгоритмов обнаружения и распознавания объектов. Модуль обучения необходим для обучения алгоритмов распознавания и обнаружения целей. При этом помимо первичного обучения предусматривается режим «дообучения», позволяющий расширять номенклатуру распознаваемых целей, а также повышать качество работы системы с использованием новой информации, поступающей непосредственно в процессе функционирования системы распознавания.

Такой подход позволяет:

- гибко учитывать изменения внешнего вида объектов, по которым уже проводилось обучение;
- учитывать появление новых образцов техники, а также средств маскировки;
- добавлять новые цели к списку уже имеющихся для расширения возможностей применения БЛА.

Базовой идеей разрабатываемой системы распознавания заданных объектов для задач навигации и управления БЛА является ее модульность. Это позволяет использовать единую программно–аппаратную архитектуру при решении практически всего спектра задач распознавания, возникающих в функциональных задачах БЛА, и гибко изменять систему при поступлении новых данных, а также в случае появления новых, более эффективных алгоритмов и методов, позволяющих существенно повысить эффективность отдельных модулей системы.

Общий состав системы распознавания имеет вид:

- модуль обучения;
- модуль обнаружения;
- модуль распознавания.

Ниже представлено краткое описание модулей.

Модуль обучения. Модуль обучения необходим для обучения алгоритмов распознавания и обнаружения. При этом помимо первичного обучения предусматривается режим «дообучения», позволяющий расширять номенклатуру распознаваемых целей, а также повышать качество работы системы с использованием новой информации, поступающей непосредственно в процессе функционирования системы распознавания.

Такой подход позволяет:

- гибко учитывать изменения внешнего вида объектов, по которым уже проводилось обучение;
- учитывать появление новых объектов, а также помеховых факторов;
- добавлять новые объекты к списку уже имеющихся для расширения возможностей применения БЛА.

Модуль обнаружения. Модуль обнаружения представляет собой набор различных алгоритмов обнаружения целевых объектов на изображении. При этом под обнаружением подразумевается локализация (определение возможного положения) объекта без распознавания его типа. Дальнейшее распознавание осуществляется модулем распознавания. В модуле обнаружения, как и в модуле распознавания, предполагается использование набора разных алгоритмов для разных масштабов изображений объектов: 32x32 (дальняя зона обнаружения), 128x128 (средняя зона обнаружения) и 256x256 (ближняя зона обнаружения). Такая структура позволит проводить поиск объектов с максимальной эффективностью.

Ниже представлены характеристики алгоритмов обнаружения для различных зон обнаружения.

Дальняя зона обнаружения

- размеры объектов: 15-48 пикселей;
- тип алгоритма: Разность Гауссианов;
- входные данные: полутоновое изображение 1280x720;
- предполагаемая производительность: 80FPS;
- среднее количество ложных срабатываний на кадр: не более 400.

Средняя зона обнаружения

- размеры объектов: 48-196 пикселей;
- тип алгоритма: Виола-Джонс/Доллар [1,2];
- входные данные: полутоновое изображение 1280x720;
- предполагаемая производительность: 60FPS;
- среднее количество ложных срабатываний на кадр: не более 200.

Ближняя зона обнаружения

- размеры объектов: 196 – любое большее пикселей;
- тип алгоритма: Доллар [1,2];
- входные данные: полутоновое изображение 1280x720;
- предполагаемая производительность: 60FPS;
- среднее количество ложных срабатываний на кадр: не более 100.

Модуль распознавания. Модуль предназначен для решения задачи распознавания целей. В качестве входных данных модуль принимает цифровое изображение, а также набор гипотез о положении целевых объектов. Этот модуль позволяет использовать его либо полностью самостоятельно (в этом случае гипотезы не задаются), либо для проверки уже известных гипотез о положении целевых объектов, полученных модулями обнаружения или на основе некоторой априорной информации. Такая архитектура объясняется тем, что в составе модуля должны быть реализованы конволюционные нейросети специальной архитектуры, что позволяет добиться наилучшего на сегодняшний день качества распознавания целевых объектов, однако требует значительных вычислительных ресурсов.

В случае автономного использования модуль распознавания позволяет проводить анализ фото и видео материалов с наилучшим возможным качеством, но не в реальном времени и должен применяться в таких задачах, где это допустимо, например, при анализе аэрофотоснимков. На рисунке 2 приведен пример анализа изображения на фотографии. В результате работы алгоритмов распознавания выделено четыре объекта типа «машина».



Рис. 2. а) фотография; б) карта объектов типа «машина»; в) выделенные объекты типа «машина»

В случае использования предварительных сведений о местоположении объекта модуль распознавания лишь проверят данные гипотезы. Гипотезы о местоположении целевого объекта поступают либо от модуля обнаружения, либо из каких-либо других источников. Такой подход позволяет повысить скорость работы системы распознавания до реального времени, при этом итоговое качество распознавания падает незначительно.

Структура модуля распознавания

Модуль распознавания представляет собой набор глубоких конволюционных сетей, предназначенных для работы с исходными данными различного масштаба. В настоящий момент рассматривается три масштаба нейросетей: 32x32 (дальняя зона обнаружения), 128x128 (средняя зона обнаружения) и 256x256 (ближняя зона обнаружения). Такая структура позволяет обрабатывать разномасштабные изображения (или гипотезы) с максимальным качеством и производительностью. При этом конкретные расстояния на местности, соответствующие различным зонам обнаружения, задаются характеристиками оптики.

Распознавание на большой дальности (дальняя зона):

- размеры объектов: 15–48 пикселей;
- количество слоев нейросети: 5;
- предполагаемая производительность: 4000 окон/сек;
- входные данные: изображение 32x32.

Распознавание на средней дальности (средняя зона):

- размеры объектов: 48–196 пикселей;
- количество слоев нейросети: 7;
- предполагаемая производительность: 1500 окон/сек;
- входные данные: изображение 128x128.

Распознавание на малой дальности (ближняя зона):

- размеры объектов: более 196 пикселей;
- количество слоев нейросети: 9;
- предполагаемая производительность: 500 окон/сек;
- входные данные: изображение 256x256.

Методика обучения

В качестве метода обучения нейросетей используется метод обратного распространения ошибки [6]. При этом предполагается, что процесс обучения происходит на высокопроизводительном вычислительном кластере, использующем либо классическую архитектуру на основе CPU, либо графические ускорители на основе GPU типа NVIDIA Tesla. При этом существует возможность использования высокопроизводительных серверов отечественного производства.

4. Задача сопровождения (прослеживания) объектов. Слежение за целевыми объектами является важнейшим компонентом системы машинного зрения БЛА. В самом простейшем случае слежение можно определить, как задачу построения траектории движения объекта в плоскости изображения, в то время как он движется на «сцене» с течением времени. Дополнительно в задачу слежения входит предоставление информации об объекте: о его размере, ориентации, форме и т.п. Работу алгоритмов слежения за целью осложняют следующие

факторы: потеря информации при переходе от 3D координат в плоскость изображения, зашумленные изображения, сложное составное движение объекта, гибкая или сложная форма прослеживаемых объектов, частичные или полные перегораживания, сложные/ часто меняющиеся условия освещенности.

5. Задача комплексирования разнородных данных в обеспечение выполнения задач БЛА. Комплексирование изображений является способом объединения информации от датчиков различной физической природы, отличающихся по спектральным, временным, радиометрическим и другим характеристикам.

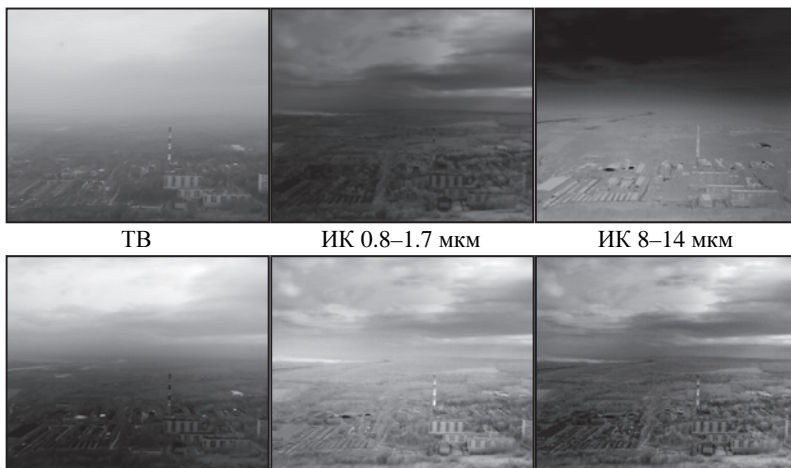
Комплексирование изображений можно разделить на три семантических уровня:

1. комплексирование на уровне пиксельной информации;
2. комплексирование на уровне характерных особенностей (черт);
3. комплексирование на уровне принятия решений.

Комплексирование на уровне характерных особенностей производится посредством их предварительного выделения для каждого входного изображения. В свою очередь, процесс комплексирования на уровне принятия решений проходит с использованием предварительной классификации выделенных характерных черт.

На сегодняшний день наилучшие результаты принадлежат алгоритмам на основе метода главных компонент и на основе вейвлет-преобразований. Высоким потенциалом для задач комплексирования изображений бортовых датчиков БЛА обладают морфологические методы [20-22], разработанные в рамках данных исследований, в частности диффузная морфология.

На рисунке 3 приведены примеры результатов трехканального комплексирования изображений. Результаты трехканального комплексирования с помощью алгоритма на основе метода главных компонент содержат инвертированные детали изображения ИК 8-14, что в ряде задач, связанных с обнаружением и анализом высококонтрастных объектов в ИК диапазоне, является неприемлемым. Результат комплексирования на основе вейвлет-преобразования в целом обладает высокой визуальной информативностью, однако, меньшим контрастом по сравнению с результатом комплексирования на основе диффузной фильтрации. В случае комплексирования на основе диффузной морфологии учитываются различия по форме — добавление информативных элементов производится именно по этому признаку, что дает более качественный и устойчивый результат, более выраженные информативные элементы.



Метод главных компо- Вейвлет-преобразование Диффузная морфология
 нент

Рис. 3. Пример исходных данных и результаты работы алгоритмов
 трехканального комплексирования

6. Задача получения и актуализации данных. Под задачей получения и актуализации данных понимается задача разработки методов и алгоритмов для формирования полетной информации, необходимых для выполнения задач БЛА. Данная совокупность алгоритмов должна обеспечивать оперативность подготовки данных, их полноту, точность, достоверность и актуальность.

Для решения задачи в части получения данных разработана методика получения модельных данных различных датчиков БЛА с учетом специфики их применения. Создана база данных эталонных синтезированных изображений для обучения алгоритмов анализа данных.

Выполнен анализ существующих и сформулированы предложения по разработке новых методов и алгоритмов актуализации данных, а именно:

- методы и алгоритмы первичной оценки показателей качества многоспектральных данных;
- методы и алгоритмы автоматического и автоматизированного дешифрирования данных;
- методы и алгоритмы автоматической геопривязки данных;
- методы и алгоритмы автоматического обновления данных на основе поиска изменений (отличий) в наблюдаемых сценах.

Разработан новый эффективный метод поиска изменений (отличий) данных и использованием диффузной морфологии на основе тепловых ядер.

Алгоритм поиска отличий основан на построении диффузного морфологического фильтра, сглаживающего одно изображение в соответствии с формой другого. Пусть I_1 — исходное изображение сцены, а I_2 — изображение этой же сцены в другой момент времени. Результат диффузной морфологической фильтрации изображения I_2 по форме изображения I_1 может быть вычислен следующим образом:

$$P_{I_2} = \sum_q A_{p,q} I_2(q),$$

где —

$$A_{p,q} = \frac{e^{-\frac{\|v(p)-v(q)\|^2}{\epsilon}}}{\sum_q e^{-\frac{\|v(p)-v(q)\|^2}{\epsilon}}}$$

диффузный оператор, построенный по изображению I_1 относительно точки p , на основе теплового ядра, описывающего ее сходство со всеми точками q в некоторой, например, прямоугольной окрестности w ; $v(p)$ — вектор признаков, по которым вычисляется сходство, вычисленный относительно точки p (например, LBP дескриптор в некотором окне с центром в p), — настроечная константа.

Для того чтобы определить отличия между изображениями, рассчитывается следующая разность:

$$\Delta = \left| I_2 - P_{I_2} \right|$$

Для обеспечения фильтрации, инвариантной к размеру отличий, процедура поиска применяется к пирамиде изображений с постоянными размерами окна фильтрации. Результаты применения данного метода для выделения отличий приведены на рисунке 4.



Рис. 4. Выделение отличий с использованием взаимной фильтрации в скользящем окне: (а) предыдущее изображение сцены; (б) текущее изображение сцены; (в) найденные отличия

Проведенные исследования позволили провести обоснованный выбор состава методов и алгоритмов, необходимых для эффективного решения задач навигации и управления БЛА. Исследование разработанных в ходе работы алгоритмы показало их функциональную и вычислительную эффективность.

7. Заключение. В ходе выполнения исследований рассмотрена предметная область проблемы, разработаны технологические основы интеллектуальной обработки, комплексирования, сопровождения и анализа информации в обеспечении функциональных задач БЛА. С этой целью сформулированы основные задачи в области анализа информации и исследованы основные методы решения данных задач.

Для автоматического обнаружения объектов заданных классов на основании анализа существующих алгоритмов и проведенных исследований предложена трехуровневая схема обнаружения объектов на фото и видео данных, сочетающая высокую скорость обработки и высокое качество обнаружения. Различные алгоритмы поиска объектов используются на изображениях различных масштабов, что позволяет проводить поиск объектов в широком диапазоне возможных размеров в реальном времени.

В области автоматического слежения за обнаруженными объектами проведенный анализ позволяет сделать вывод о том, что на сегодня не существует одного универсального алгоритма слежения, пригодного для широкого спектра условий навигации и управления БЛА. В связи с этим обоснован выбор комплексных алгоритмов, основанных на кадровом обнаружении объекта (CNN) в сочетании с фильтрацией наблюдений (фильтрами частиц, фильтром Калмана) или алгоритмами сопоставления. Кроме того, для обеспечения высокоточного слежения разработаны алгоритмы на основе корреляционной фильтрации, способные обрабатывать сложные движения (вращение, блуждание) целей в сложных условиях ракурсных искажений и изменения масштаба.

В области автоматического распознавания объектов заданных классов проведенный анализ показал, что на сегодняшний день лучшие результаты показывают системы распознавания, основанные на глубоких конволюционных сетях. Такие системы позволяют распознавать целевые объекты практически при любых условиях съемки. Для решения проблемы медленной работы конволюционных сетей предложена оригинальная модульная схема распознавания, позволяющая проводить высококачественное распознавание объектов интереса в реальном времени.

В области автоматизированного дешифрирования данных для подготовки специализированной информации анализ методов и алго-

ритмов показал, что наилучший результат дает комплексное использование структурных признаков и спектральных особенностей много-спектральных изображений. Разработана структура процесса автоматизированного дешифрирования, включающая улучшение качества изображений, робастное уточнение границ объекта, автоматизированную или автоматическую классификацию на основе предварительно обученных алгоритмов классификации объектов.

В области автоматической геопривязки данных проведенный анализ позволяет сделать вывод о том, что необходимым условием точной привязки является наличие высокоточной априорной геоинформации (ортофотопланов). Для автоматической привязки изображений к ортофотопланам разработаны методы, основанные на быстром робастном поиске и последующем интеллектуальном сопоставлении особых точек, а также компенсации искажений снимков, вызываемых условиями съемки.

Для автоматической оценки качества многоспектральных данных разработаны алгоритмы безотносительных оценок качества изображений: оценки, основанные на выделении набора признаков и их последующей привязке к мультивариативной гауссовой модели, и оценки с использованием локальных пространственных и спектральных признаков энтропии. Тестирование разработанных алгоритмов показало высокую надежность правильного отбора качественных данных для решения задач информационного обеспечения БЛА.

Разработаны методы получения и актуализации данных для формирования полетной информации БЛА:

- разработана методика получения модельных данных с различных датчиков БЛА с учетом специфики их применения;
- создана база данных эталонных синтезированных изображений для обучения алгоритмов анализа данных, предназначенная для накопления и систематизации большого количества синтезированных изображений объектов интереса, смоделированных для различных суточных и погодных условий с разнообразных точек наблюдения.

Проанализированы существующие и разработаны новые методы и алгоритмы актуализации данных для формирования полетной информации БЛА, в том числе методы и алгоритмы первичной оценки показателей качества многоспектральных данных, методы и алгоритмы автоматического и автоматизированного дешифрирования данных, методы и алгоритмы автоматической геопривязки данных, методы и алгоритмы автоматического обновления данных на основе поиска изменений (отличий) в наблюдаемых сценах.

Литература

1. *Dollár P., Zitnick C.* Fast Edge Detection Using Structured Forests // IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. 2015. vol. 8. no. 37. pp. 1558–1570.
2. *Dollár P., Appel R., Belongie S., Perona P.* Fast Feature Pyramids for Object Detection // IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. 2014. vol.8. no. 36. pp. 1532–1545.
3. *Viola P., Jones M.J.* Rapid Object Detection using a Boosted Cascade of Simple Features // IEEE CVPR. 2001. vol.1. pp. 511–518.
4. *Lowe D. G.* Object recognition from local scale-invariant features // Proceedings of the International Conference on Computer Vision 2. 1999. pp. 1150–1157.
5. *Girshick R.* Fast R-CNN // The IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV). 2015. pp. 1440–1448.
6. *Бекетова И.В., Карамеев С.Л., Визильтер Ю.В., Желтов С.Ю.* Алгоритм автоматического обучения каскадного классификатора на основе метода адаптивного усиления AdaBoost // Многопроцессорные вычислительные и управляющие системы (МВУС–2009): Материалы международной научно-технической конференции. Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ. 2009. Т.2. С. 239–240.
7. *Lienhart R., Maydt J.* An Extended Set of Haar-like Features for Rapid Object Detection // IEEE ICIP. 2002. vol. 1. pp. 900–903.
8. *Yang F., Wang Z., Hung Y. S.* Robust Kalman filtering for discrete time-varying uncertain systems with multiplicative noise // IEEE Trans. Automat. Control. 2002. vol. 47. no. 7. pp. 1179–1183.
9. *Einicke G.A., White L.B.* Robust Extended Kalman Filtering // IEEE Trans. Signal Processing. 1999. vol. 9. no. 47. pp. 2596–2599.
10. *Wildes R. et al.* Aerial Video Surveillance and Exploitation // Proc. IEEE. 2001. vol. 89. no. 10. pp. 1518–1539.
11. *Comaniciu D., Ramesh V., Meer P.* Real-Time Tracking of Non-Rigid Objects Using Mean Shift // Proc. IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition. Hilton Head. SC. 2000. vol. 2. pp. 142–149.
12. *Ning J., Zhang L., Zhang D., Wu C.* Scale and orientation adaptive mean shift tracking // Computer Vision. IET. 2012. vol. 6. pp. 52–61.
13. *Henriques J. F., Caseiro R., Martins P., Batista J.* High-speed tracking with kernelized correlation filters // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2014. vol. 37. Issue 3. pp. 583–596.
14. *Kulis B., Grauman K.* Kernelized locality-sensitive hashing // IEEE Transactions Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2012. vol.6. no. 34. pp. 1092–1104.
15. *Gall J., Yao A., Razavi N., Gool L.V., Lempitsky V.* Hough Forests for Object Detection, Tracking, and Action Recognition // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2011. vol. 33. no. 11. pp. 2188–2202.
16. *Ding Y., Wang Y.* Analysis and Evaluation on Fusion Methods of Medium and High Spatial Resolution Remote Sensing Image // IEEE, 19th International Conference on Geoinformatics. 2011. pp. 1–4.
17. *Dawei Z., Fang Z.* A New Improved Hierarchical Model of Image Fusion // IEEE The Eighth International Conference on Electronic Measurement and Instruments, ICEMI. 2007. vol. 2. pp 853–857.
18. *Bengio Y., Monperrus M.* Non-local manifold tangent learning // Advances in Neural Information Processing Systems 17. Cambridge: MIT Press, MA, 2005. 1971 p.
19. *İlsever M., Unsalan C.* Two-Dimensional Change Detection Methods // London: Springer-Verlag, 2012. 72 p.
20. *Pyt'ev Yu.P.* Morphological Image Analysis // Pattern Recognition and Image Analysis. 1993. vol. 1. no. 3. pp. 19–28.

21. *Vizilter Y. V., Zheltov, S. Y.* Geometrical Correlation and Matching of 2D Image Shapes // ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci. 2012. Issue 3. pp. 191–196.
22. *Визильтер Ю.В., Горбацевич В.С., Рубис А.Ю., Выголов О.В.* Сравнение изображений по форме с использованием диффузной морфологии и диффузной корреляции // Компьютерная оптика. 2015. Т. 39. № 2. С. 265–274.
23. *Gu K., Zhang W., Wang C., Zhai G.* Full-reference image quality assessment via region-based analysis // Proceedings of the 4th International Congress on Image and Signal Processing (CISP '11). 2011. vol. 3. pp. 1711–1715.
24. *Bovik A.C.* Perceptual image processing: Seeing the future // Proc. IEEE. 2010. vol. 98. no. 11. pp. 1799–1803.
25. *Lowe D.G.* Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints // International Journal of Computer Vision. 2004. vol.2. no. 60. pp. 91–110.
26. *Moorthy A.K., Bovik A.C.* Blind Image Quality Assessment: From Scene Statistics to Perceptual Quality // IEEE Transactions Image Processing 2011. vol. 20. no. 12. pp. 3350–3364.

References

1. *Dollár P., Zitnick C.* Fast Edge Detection Using Structured Forests. IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. 2015. vol. 8. no. 37. pp. 1558–1570.
2. *Dollár P., Appel R., Belongie S., Perona P.* Fast Feature Pyramids for Object Detection. IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. 2014. vol.8. no. 36. pp. 1532–1545.
3. *Viola P., Jones M.J.* Rapid Object Detection using a Boosted Cascade of Simple Features. IEEE CVPR. 2001. vol.1. pp. 511–518.
4. *Lowe D. G.* Object recognition from local scale-invariant features. Proceedings of the International Conference on Computer Vision 2. 1999. pp. 1150–1157.
5. *Girshick R.* Fast R-CNN. The IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV). 2015. pp. 1440–1448.
6. *Beketova I.V., Karateev S.L., Vizil'ter Ju.V., Zheltov S.Ju.* [The algorithm for automatic training of a cascade classifier based on the adaptive gain method AdaBoost] *Mnogoprocessornye vychislitel'nye i upravljajushhie sistemy (MVUS-2009): Materialy mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii* [Multiprocessor computing and control systems (MCCS-2009): proceedings of international scientific-technical conference]. Taganrog: Publisher TTI JuFU. 2009. vol.2. pp. 239–240. (In Russ.).
7. *Lienhart R., Maydt J.* An Extended Set of Haar-like Features for Rapid Object Detection. IEEE ICIP. 2002. vol. 1. pp. 900–903.
8. *Yang F., Wang Z., Hung Y. S.* Robust Kalman filtering for discrete time-varying uncertain systems with multiplicative noise. IEEE Trans. Automat. Control. 2002. vol. 47. no. 7. pp. 1179–1183.
9. *Einicke G.A., White L.B.* Robust Extended Kalman Filtering. IEEE Trans. Signal Processing. 1999. vol. 9. no. 47. pp. 2596–2599.
10. *Wildes R. et al.* Aerial Video Surveillance and Exploitation. Proc. IEEE. 2001. vol. 89. no. 10. pp. 1518–1539.
11. *Comaniciu D., Ramesh V., Meer P.* Real-Time Tracking of Non-Rigid Objects Using Mean Shift. Proc. IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition. Hilton Head. SC. 2000. vol. 2. pp. 142–149.
12. *Ning J., Zhang L., Zhang D., Wu C.* Scale and orientation adaptive mean shift tracking. Computer Vision. IET. 2012. vol. 6. pp. 52–61.
13. *Henriques J. F., Caseiro R., Martins P., Batista J.* High-speed tracking with kernelized correlation filters. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2014. vol. 37. Issue 3. pp. 583–596.

14. *Kulis B., Grauman K.* Kernelized locality-sensitive hashing. *IEEE Transactions Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2012. vol.6. no. 34. pp. 1092–1104.
15. *Gall J., Yao A., Razavi N., Gool L.V., Lempitsky V.* Hough Forests for Object Detection, Tracking, and Action Recognition. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2011. vol. 33. no. 11. pp. 2188–2202.
16. *Ding Y., Wang Y.* Analysis and Evaluation on Fusion Methods of Medium and High Spatial Resolution Remote Sensing Image. *IEEE, 19th International Conference on Geoinformatics*. 2011. pp. 1–4.
17. *Dawei Z., Fang Z.* A New Improved Hierarchical Model of Image Fusion. *IEEE The Eighth International Conference on Electronic Measurement and Instruments, ICEMI*. 2007. vol. 2. pp 853–857.
18. *Bengio Y., Monperrus M.* Non-local manifold tangent learning. *Advances in Neural Information Processing Systems 17*. Cambridge: MIT Press, MA, 2005. 1971 p.
19. *Ilsever M., Unsalan C.* Two-Dimensional Change Detection Methods. London: Springer-Verlag, 2012. 72 p.
20. *Pyt'ev Yu.P.* Morphological Image Analysis. *Pattern Recognition and Image Analysis*. 1993. vol. 1. no. 3. pp. 19–28.
21. *Vizil'ter Y. V., Zheltov, S. Y.* Geometrical Correlation and Matching of 2D Image Shapes. *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* 2012. Issue 3. pp. 191–196.
22. *Vizil'ter Ju.V., Gorbacevich V.S., Rubis A.Ju., Vygolov O.V.* [Comparison of the images on the form using the diffuse morphology and diffuse correlation] *Komp'yuternaja optika – Computer optics*. 2015. T. 39. № 2. С. 265–274. (In Russ.).
23. *Gu K., Zhang W., Wang C., Zhai G.* Full-reference image quality assessment via region-based analysis. *Proceedings of the 4th International Congress on Image and Signal Processing (CISP '11)*. 2011. vol. 3. pp. 1711–1715.
24. *Bovik A.C.* Perceptual image processing: Seeing the future. *Proc. IEEE*. 2010. vol. 98. no. 11. pp. 1799–1803.
25. *Lowe D.G.* Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. *International Journal of Computer Vision*. 2004. vol.2. no. 60. pp. 91–110.
26. *Moorthy A.K., Bovik A.C.* Blind Image Quality Assessment: From Scene Statistics to Perceptual Quality. *IEEE Transactions Image Processing* 2011. vol. 20. no. 12. pp. 3350–3364.

Князь Владимир Александрович — к-т техн. наук, заместитель начальника подразделения, ФГУП «Государственный научный центр «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем» (ГосНИИАС). Область научных интересов: машинное зрение, обработка изображений, фотограмметрия, виртуальная реальность. Число научных публикаций — 212. knyaz@gosniias.ru, <http://gosniias.ru>; ул. Викторенко, 7, Москва, 125319; р.т.: +7 499 157 3127, Факс: +7 499 943 8605.

Knyaz Vladimir Alexandrovich — Ph.D., deputy head of department, State Research Institute of Aviation Systems. Research interests: machine vision, pattern recognition, virtual reality, photogrammetry, 3D reconstruction, data fusion. The number of publications — 212. knyaz@gosniias.ru, <http://gosniias.ru>; 7, Victorenko str., Moscow, 125319; office phone: +7 499 157 3127, Fax: +7 499 943 8605.

Вишняков Борис Вансович — начальник лаборатории, ФГУП «Государственный научный центр «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем» (ГосНИИАС). Область научных интересов: обработка изображений, распознавание образов, анализ видеопоследовательностей, обнаружение объектов. Число научных пуб-

ликаций — 40. vishnyakov@gosniias.ru, <http://me.ellectu.net>; ул. Викторенко, 7, Москва, 125319; р.т.: +79031086453.

Vishnyakov Boris Vaisovich — head of laboratory, State Research Institute of Aviation Systems. Research interests: machine vision, deep learning, video analytics, object detection. The number of publications — 40. vishnyakov@gosniias.ru, <http://me.ellectu.net>; 7, Victorenko str., Moscow, 125319; office phone: +79031086453.

Визильер Юрий Валентинович — д-р физ.-мат. наук, профессор Российской академии наук, начальник подразделения, ФГУП «Государственный научный центр «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем» (ГосНИИАС). Область научных интересов: машинное зрение, обработка изображений, машинное обучение. Число научных публикаций — 163. viz@gosniias.ru; ул. Викторенко, 7, Москва, 125319; р.т.: +7 499 157 9498.

Vizilter Yuri Valentinovich — Ph.D., Dr. Sci., professor of the Russian academy of sciences, head of department, State Research Institute of Aviation Systems. Research interests: machine vision, deep learning, object detection and recognition. The number of publications — 163. viz@gosniias.ru; 7, Victorenko str., Moscow, 125319; office phone: +7 499 157 9498.

Горбачевич Владимир Сергеевич — д-р полит. наук, начальник сектора, ФГУП «Государственный научный центр «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем» (ГосНИИАС). Область научных интересов: машинное зрение, обработка изображений, машинное обучение. Число научных публикаций — 40. gvs@gosniias.ru; ул. Викторенко, 7, Москва, 125319; р.т.: +79161981701, Факс: +79161981701.

Gorbatsevich Vladimir Sergeevich — head of department, State Research Institute of Aviation Systems. Research interests: machine vision, deep learning, face recognition. The number of publications — 40. gvs@gosniias.ru; 7, Victorenko str., Moscow, 125319; office phone: +79161981701, Fax: +79161981701.

Выголов Олег Вячеславович — к-т техн. наук, начальник лаборатории, ФГУП «Государственный научный центр «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем» (ГосНИИАС). Область научных интересов: обработка и анализ изображений, комплексирование информации в технических системах, навигация и управление мобильными объектами с использованием технического зрения. Число научных публикаций — 30. o.vygolov@gosniias.ru; ул. Викторенко, 7, Москва, 125319; р.т.: +7 499 157 9318.

Vygolov Oleg Vjacheslavovich — Ph.D., head of laboratory, State Research Institute of Aviation Systems. Research interests: machine vision, enhanced vision, synthetic vision, object detection and recognition. The number of publications — 30. o.vygolov@gosniias.ru; 7, Victorenko str., Moscow, 125319; office phone: +7 499 157 9318.

Поддержка исследований. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 15-08-99580а), РФФИ (проект 14-07-00914а).

Acknowledgements. This research is supported by RFBR (grant 15-08-99580а, grant 14-07-00914а).

РЕФЕРАТ

Князь В.А., Вишняков Б.В., Визильтер Ю.В., Горбацевич В.С., Выголов О.В. **Технологии интеллектуальной обработки информации для задач навигации и управления беспилотными летательными аппаратами.**

Прогресс в технических характеристиках датчиков получения информации и средств обработки данных создал предпосылки для появления и развития интеллектуальных систем управления, автономно решающих сложные функциональные задачи, традиционно относящиеся к компетенции человека-оператора, такие как, например, обнаружение и прослеживание объектов, их классификация. Для эффективного выполнения основных функций беспилотным летательным аппаратом требуется решение взаимосвязанного комплекса задач обработки разносенсорной информации, получаемой бортовыми датчиками системы управления.

Проведенные исследования по разработке технологий обработки разносенсорной информации для навигации и управления беспилотными летательными аппаратами позволили выделить основные задачи предметной области: обработка и комплексирование изображений различных спектральных диапазонов, обнаружение и локализация объектов, прослеживание объектов, распознавание объектов. Предложены оригинальные методы комплексирования разноспектральных изображений, основанные на диффузной морфологии, разработаны методики подготовки обучающих выборок и глубокого машинного обучения, обеспечивающие существенно более высокие показатели качества распознавания, создана база данных эталонных синтезированных изображений объектов для обучения алгоритмов распознавания.

SUMMARY

Knyaz V.A., Vishnyakov B.V., Vizilter Yu.V., Gorbatsevich V.S., Vygolov O.V. **Intelligent Data Processing Technologies for Unmanned Aerial Vehicles Navigation and Control.**

Recent achievements in technical characteristics of new sensors and data processors make it possible to develop intelligent control systems able to perform a set of complex tasks that traditionally were carried out by the operator. Examples of such tasks include object detection and recognition, object classification. For effective unmanned aerial vehicle (UAV) navigation and control it is necessary to solve a set of tasks of processing the heterogeneous data from various sensors.

The performed research into the developing technologies for UAV heterogeneous data processing allows one to define the basic problems of heterogeneous information processing such as multiband image processing and fusion (both for flight planning and onboard processing), object detection and localization, object tracking, object recognition. Original methods are proposed for multiband images fusion based on diffuse morphology. The original methods are developed for deep machine learning, which provide high probabilities of detection and recognition of given objects. The database of model images for machine learning algorithms is created.

В.С. ЛАЗАРЕВ, Д.Э. АГАДЖАНОВ
**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ
ФОРМИРОВАНИЯ ТРАЕКТОРИИ ГРУППЫ ПОДВИЖНЫХ
ОБЪЕКТОВ В ДВУМЕРНОЙ СРЕДЕ**

Лазарев В.С., Агаджанов Д.Э. Использование графоаналитических методов для формирования траектории группы подвижных объектов в двумерной среде.

Аннотация. Рассматривается задача формирования траекторий движения группы подвижных объектов, функционирующих в двумерной среде с неподвижными препятствиями. Эта задача решалась графоаналитическими методами, основанными на алгоритмах Дейкстры, Беллмана-Форда и A*. Поставлен эксперимент, включающий компьютерное моделирование, результатами которого явились данные о времени движения группы подвижных объектов по траекториям. На основании данных результатов моделирования произведено их сравнение, которое позволило сделать вывод об эффективности различных методов решения задачи, и помогло выявить наиболее оптимальный.

Ключевые слова: Групповое управление, подвижный объект, графоаналитические методы, алгоритм Дейкстры, алгоритм Беллмана-Форда, алгоритм A*.

Lazarev V.S., Agadjanov D.E. Using Graphic-Analytical Methods for Robots Group Movement Trajectories Formation in the Two-Dimensional Environment.

Abstract. The problem of movement trajectories formation of a vehicle robots group, functioning in the two-dimensional environment with motionless obstacles, is considered. For the solution of this task, it is possible to use graphic-analytical methods. These methods are based on Dijkstra's algorithms, Bellman-Ford and A *. We carry out experiment including 100 iterations of computer modeling. The results of modeling are data on time of vehicle robots group movement on trajectories developed by means of the algorithms. On the basis of the modeling results was made a comparison of methods. This comparison has allowed revealing the most optimum of methods.

Keywords: Robots group control; vehicle; graphic-analytical methods; Dijkstra's algorithm; Bellman-Ford algorithm; A* algorithm.

1. Введение. В настоящее время актуальной проблемой является создание групп роботов, автономно функционирующих в неопределенной среде и эффективно решающих задачи противодействия роботам противника, выполняющим как одиночные, так и групповые миссии. Решение указанной проблемы требует разработки методов планирования поведения роботов, включающих формирование целей и критериев движения, адаптивное распределение и перераспределение целей и функций в группе. Одной из первоочередных задач в рамках данной проблемы является планирование траектории автономного подвижного объекта [1]. Актуальность развития автоматизации управления движением также подчеркивается в работе [2] и в работах XII всероссийского совещания по проблемам управления [3].

Для решения задачи планирования траектории используются методы позиционно-траекторного управления [4], методы потенциал-

ных полей, графоаналитические методы, а также методы, основанные на использовании интеллектуальных и нейросетевых технологий, генетических алгоритмов и неустойчивых режимов [5]. В свою очередь, графоаналитические методы, например, часто включают элементы теории потенциальных полей и алгоритмы поиска путей на графе. Примерами могут служить работы [6, 7], где метод потенциальных полей [8] используется совместно с алгоритмами A^* и DF^* . В данной работе рассмотрены графоаналитические методы и проведено их сравнение, используя сочетание модели кинематики подвижного объекта и алгоритмов поиска кратчайшего пути на графе.

1. Описание сравниваемых графоаналитических методов.

Рассмотрим подвижные объекты, уравнения кинематики которых имеют вид (рисунок 1).

$$\dot{y}_{1i} = V_i \cos \varphi_i, \quad \dot{y}_{2i} = V_i \sin \varphi_i, \quad (1)$$

где y_{1i} y_{2i} — координаты подвижного объекта; V_i — скорость подвижного объекта; φ_i — угол курса подвижного объекта; $i = \overline{1, n}$.

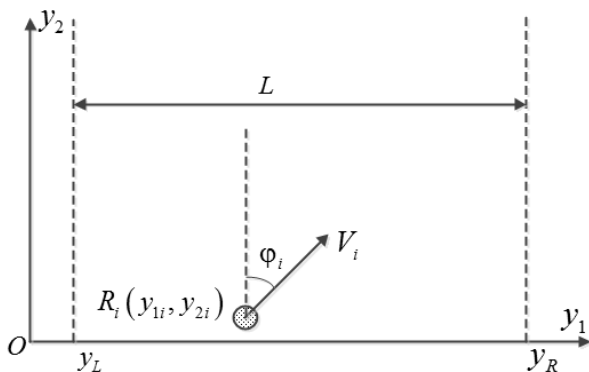


Рис. 1. Параметры подвижного объекта

Положение подвижного объекта характеризуется координатами y_{1i} y_{2i} . Скорость V_i и курсовой угол φ_i являются управлениями. Каждый подвижный объект имеет информацию о координатах y_L y_R области L , в которой функционирует группа [9]. Число n подвижных объектов в группе может быть неизвестным. Ставится задача перемещения группы, состоящей из нескольких подвижных объектов, от начальной координаты к конечной координате, осуществляя при этом обход препятствий, встречающихся на пути.

В рамках задачи область, в которой движутся подвижные объекты, представлена в виде сетки-графа. Роль препятствий на пути движения подвижного объекта (ПО) играют отсутствующие ребра и/или вершины, в зависимости от размеров и формы препятствия. Этот подход может использоваться в сочетании с картографированием, что дает возможность роботу двигаться по заранее заданной траектории [10].

Аналогичный способ представления области функционирования ПО применяется при анализе траекторий движения людей [11], облете препятствий в воздухе, перемещении груза автокранами [12] и в различных задачах с использованием мультиагентных технологий. В вышеперечисленных работах подчеркивается, что для решения задачи кратчайшего пути наиболее часто используются алгоритмы Дейкстры, Беллмана-Форда и A^* .

Таким образом, ставится задача сравнения трех графоаналитических методов:

1. метода, сочетающего модель кинематики ПО (1) и алгоритм Дейкстры [13];
2. метода, сочетающего модель кинематики ПО (1) и алгоритм Беллмана-Форда [14];
3. метода, сочетающего модель кинематики ПО (1) и алгоритм A^* [15-16].

Критерием сравнения данных методов будет выступать время, за которое подвижные объекты добираться до конечной точки.

3. Компьютерное моделирование работы алгоритмов. Эксперимент был проведен с помощью средств языка программирования Python, используя библиотеку для работы с графами networkx [17].

В эксперименте описывалось три робота (подвижных объекта). Их модели кинематики описываются уравнениями (1).

В качестве поля был выбран граф величиной 25×25 вершин. Каждый методом проведено 100 экспериментов, результаты которых использовались для формирования среднего значения времени прохождения траектории. Точки старта и финиша в каждом из 100 экспериментов изменялись, но находились в одной области (точки старта не далее, чем на одну вершину друг от друга, точки финиша соответственно). Были заданы и координаты препятствий.

При старте программы инициализируются роботы. Задаются их начальные координаты и координаты точки назначения. После этого происходит создание графа. Задаются его размеры, координаты препятствий с последующим их созданием на готовом графе. Создание препятствий представляет собой удаление вершин графа и ребер ее с графом соединяющих. Далее происходит поиск и построение оптимальной траектории движения для роботов. После отображается пройденная роботами траектория.

На рисунке 3 представлен граф с созданными препятствиями, среди которых роботам предстоит искать траекторию движения. Также на рисунке 4 представлены вариации прохождения пути тремя роботами от начальных вершин к конечным. Для того чтобы различить траектории роботов на рисунке, можно опираться на маркеры, обозначающие данные траектории. Подробное описание маркеров приведено на рисунке 2.





-  - точка финиша
-  - траектория первого робота
-  - траектория второго робота
-  - траектория третьего робота

Рис. 2. Маркеры обозначений траекторий роботов

Отсутствующие вершины являются препятствиями, выбранными заранее и неизменными в рамках эксперимента.

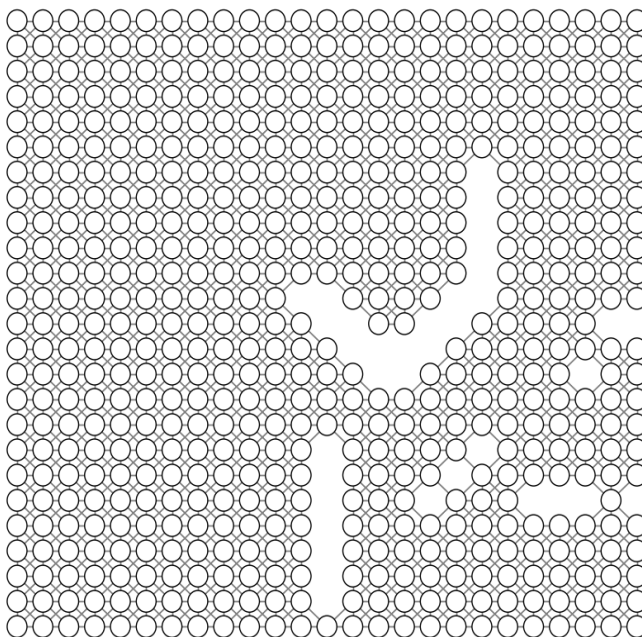


Рис. 3. Граф с препятствиями

Также следует отметить, что расстояние между соседними вершинами одинаково независимо от их взаимного расположения. Таким

образом, расстояние, проходимое по диагонали равно расстоянию, проходимому строго вдоль одной из осей.

Движение роботов происходит благодаря перемещению через вершины по связывающим их ребрам. Следовательно, препятствия, являющиеся собой отсутствующие узлы, уничтожают также и ребра, связывающие их с остальным графом, не позволяя роботу пройти напрямую через препятствие. Так при отсутствии возможности перемещения робот ищет обходной путь, чтобы миновать препятствие.

Для нахождения оптимального пути происходит вычисление траектории от точки старта к точке финиша. Вычисляется длина получившейся траектории и сравнивается с предыдущей. И если новый путь короче, то он и становится приоритетным. Таким образом, подбором вычисляется наиболее короткий путь для каждого отдельного робота, тем самым сокращая суммарную траекторию движения роботов. Так происходит до момента перебора всех возможных путей. Далее представлен процесс выбора оптимальной траектории для робота. Происходит перебор различных траекторий до момента нахождения оптимальной. На рисунке 4 представлены траектории движения роботов по полю от стартовой точки к конечной точке.

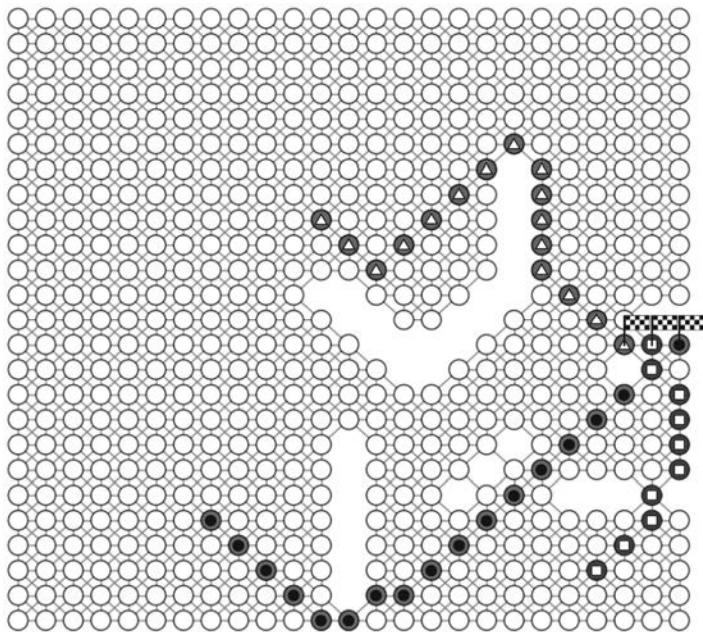


Рис. 4. Пример траектории движения роботов

Далее на рисунке 5 представлена блок-схема алгоритма работы программы, созданной для проведения эксперимента.

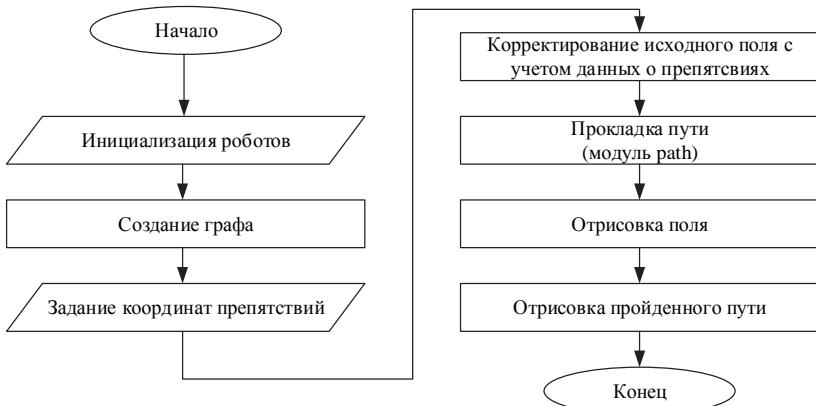


Рис. 5. Блок-схема работы программы

Модуль path используется для поиска и построения оптимального пути. Описание структуры программы приводится на рисунке 6.

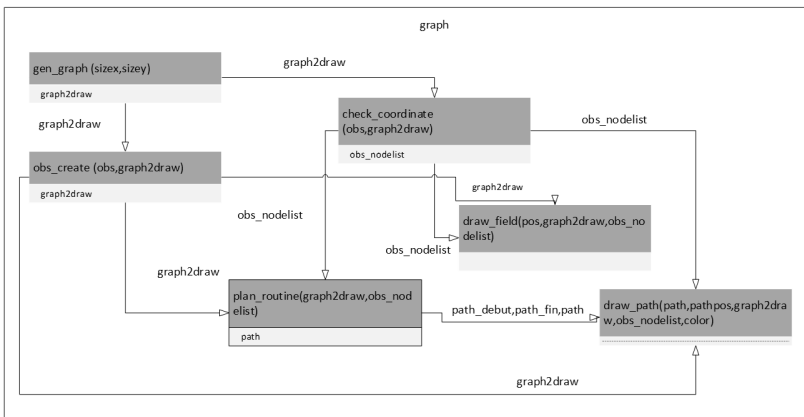


Рис. 6. Описание структуры программы

В результате проведенного эксперимента было выявлено время, затрачиваемое на поиск и построение оптимальной траектории движения трех роботов для трех различных алгоритмов. В процессе эксперимента оставались неизменными препятствия на поле и размеры графа. На рисунках 7-9 приведены графики, где t — потраченное на поиск, построение и прохождение оптимальной траектории движения, и n — номер эксперимента. Каждый график связан с определенным алгоритмом.

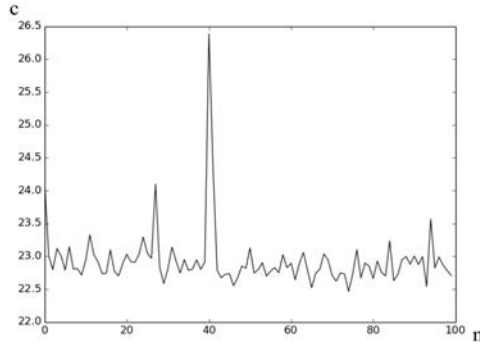


Рис. 7. Данные о времени, затрачиваемом на поиск, построение и прохождение оптимальной траектории движения с использованием алгоритма Дейкстры

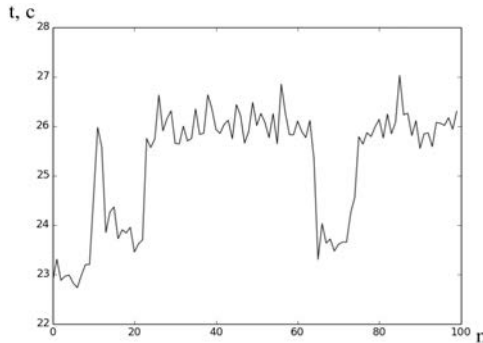


Рис. 8. Данные о времени, затрачиваемом на поиск, построение и прохождение оптимальной траектории движения с использованием алгоритма A*

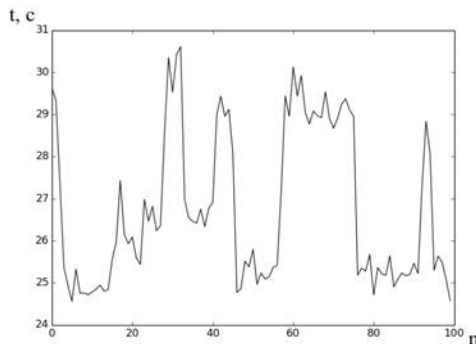


Рис. 9. Данные о времени, затрачиваемом программой на поиск, построение и прохождение оптимальной траектории движения с использованием алгоритма Беллмана-Форда

4. Анализ результатов эксперимента. На графиках (рисунках 7-9) показаны значения времени для каждого из алгоритмов. На основании этих графиков можно сделать вывод о среднем времени движения группы роботов по траекториям, рассчитанным при помощи алгоритмов. Данное время будет равным:

- алгоритм Дейкстры – $22,487 \pm 0,0548$ сек (при доверительной вероятности 0,95);
- алгоритм A^* – $24,7994 \pm 0,0948$ сек (при доверительной вероятности 0,95);
- алгоритм Беллмана-Форда – $25,284 \pm 0,0305$ сек (при доверительной вероятности 0,95).

Исходя из полученных данных, видно, что затрачиваемое на поиск оптимального пути время меньше у метода с использованием алгоритма Дейкстры, что говорит преимуществе данного алгоритма перед другими представленными. Однако разница во времени между алгоритмами в среднем от 1 до 2 секунд, что не слишком много.

Данные алгоритмы, как уже было сказано, часто используются для решения задач планирования траектории или поиска пути. В работе [12] осуществлялся поиск оптимального пути перемещения груза автокраном, в ней сравнивались методы с применением алгоритмов Беллмана-Форда и Дейкстры. Изначально в эксперименте итоговый путь, рассчитанный с помощью алгоритма Дейкстры, был длиннее на 7-11%. Однако после оптимизации результаты по алгоритму Беллмана-Форда стали на 2-3% хуже, чем по алгоритму Дейкстры. Авторы назвали разницу в пути незначительной, такую же оценку можно найти в работе [18].

Аналогичная нашему случаю карта, использовалась в работе [11] с целью моделирования движения людей. Было указано, что алгоритм Дейкстры в таких условиях предпочтительнее алгоритма Беллмана-Форда. В условиях же города, где область больше по размеру и с большим количеством препятствий [19] алгоритм Беллмана-Форда дает выигрыш во времени при условии, что число вершин n больше числа ребер m графа ($n > m$), что обуславливает использование его в механических транспортных системах [20]. При большей сложности графа, более эффективным является алгоритм A^* [21]. Он дает кратное числу вершин n уменьшение вычислительной сложности поиска.

Таким образом, результаты поставленного эксперимента согласуются с работами ученых, что позволяет сделать вывод об эффективности метода, использующего алгоритм Дейкстры перед другими алгоритмами, рассмотренными в работе.

5. Заключение. В статье предложены и проанализированы графоаналитические методы планирования траектории группы подвижных объектов. Методы отличаются использованием модели кинематики подвижных объектов в группе и одного из трех алгоритмов: алго-

ритм Дейкстры, алгоритм Беллмана-Форда и алгоритм A*. При помощи программы, реализованной средствами среды программирования Python, в частности благодаря библиотеке network, было проведено 100 экспериментов, каждый из которых предоставлял данные о времени, затрачиваемом на построение и прохождение кратчайшей траектории от начальных к конечным точкам роботов. В результате полученных данных был сделан вывод об эффективности алгоритма Дейкстры перед остальными, представленными в работе, что подтверждает данные, получаемые другими учеными.

Графоаналитический метод, использующий алгоритм Дейкстры и показавший лучший результат, может применяться в разработке траекторий групп роботов в условиях противодействия.

Литература

1. Чернухин Ю.В., Пищопов В.Х., Писаренко С.Н., Трубочев О.Е. Программная среда для моделирования поведения адаптивных мобильных роботов с двухуровневой системой управления // Мехатроника. 2000. № 6. С. 26–30.
2. Алфимов С.М. Перспективные направления развития базовых военных технологий в области создания систем управления и обработки информации // Мехатроника, автоматизация и управление. 2008. № 2. С. 2–5.
3. Черноусько Ф.Л., Болотник Н.Н., Градецкий В.Г. Мобильные роботы: проблемы управления и оптимизации движений // Труды XII Всероссийского совещания по проблемам управления. Москва. 2014. С. 19.
4. Пищопов В.Х. Позиционно-траекторное управление подвижными объектами // Таганрог: ТТИ ЮФУ. 2009. 183 с.
5. Гузик В.Ф. и др. Интеллектуальное планирование траекторий подвижных объектов в средах с препятствиями / Под редакцией В.Х. Пищопова // М.: Физматлит. 2014. 350 с.
6. Macek K., Petrovic I., Ivanjko E. An Approach to Motion Planning of Indoor Mobile Robots // In Proc. IEEE International Conference on Industrial Technology. 2003. pp. 969–973.
7. Stentz A et. al. The Focussed D* Algorithm for Real-Time Replanning // In Proc. International Joint Conference on Artificial Intelligence. 1995. vol. 95. pp. 1652–1659.
8. Платонов А.К., Карпов И.И., Кирильченко А.А. Метод потенциалов в задаче прокладки трассы // М.: Препринт Института прикладной математики АН СССР. 1974. 27 с.
9. Пищопов В.Х., Медведев М.Ю. Управление подвижными объектами в определенных и неопределенных средах // М.: Наука. 2011. 350 с.
10. Pozna C., Precup R.E., Kocsy L.T., Ballagi A. Potential field-based approach for obstacle avoidance trajectories // The IPSI Bgd Transactions on Inter-net Research. vol. 8. no 2. 2002. pp. 40–45.
11. Попел Е.В. Обработка информации о поле расстояний в задаче моделирования движения людей // Перспективы развития информационных технологий. 2012. № 10. С. 20–25.
12. Щербатов В.С., Корытов М.С. Использование алгоритмов поиска пути перемещения груза автокраном на графах // Вестник ВГТУ. 2009. № 5. С. 37–41.
13. Dijkstra E. W. A note on two problems in connexion with graphs // Numerische mathematik. 1959. vol. 1. no. 1. pp. 269–271.
14. Bellman R. On a Routing Problem // Quarterly of Applied Mathematics. 1958. vol. 16. no. 1. pp. 87–90.

15. Hart P.E., Nilsson N.J., Raphael B. A. Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths // IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics. 1968. no. 2. pp. 100–107.
16. Hart P.E., Nilsson N.J., Raphael B. Correction to «A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths» // SIGART Newsletter. 1972. vol. 37. С. 28–29.
17. Hagberg A., Schult D., Swart P. NetworkX Reference Release 1.11 URL: <https://media.readthedocs.org/pdf/networkx/stable/networkx.pdf>. (Дата обращения: 31.01.16).
18. Кинер А.В., Станкевич Т.С. Система для выбора кратчайшего безопасного маршрута спасения людей из горящего здания на территории морского порта // Вестник АГТУ. Управление, вычислительная техника и информатика. 2013. № 2. С. 144–152.
19. Сундетов Р.Н., Есламгалиев Т.Н. Обоснование выбора алгоритма поиска оптимального пути с расчетом показателей светофора в городской сети // Естественные и математические науки в современном мире. 2015. № 5(29). С. 133–137.
20. Беляков С.Л., Белякова М.Л., Боженюк А.В., Савельева М.Н. Оптимизация потоков в транспортных системах // Известия ЮФУ. Технические науки. 2014. № 5(154). С. 161–167.
21. Дубовик Н.Н., Лавров А.В., Ногин О.А., Туманов В.М. Анализ методов пространственной навигации и трассировки маршрутов с линейными ограничениями // МНИЖ. 2015. № 11–2(42). С. 35–42.

References

1. Chernukhin Yu.V., Pshikhopov V.H., Pisarenko S.N., Trubachev O.E. [The program environment for modeling of adaptive mobile robots behavior with a two-level control system]. *Mehatronika – Mechatronics*. 2000. vol. 6. pp. 26–30. (In Russ.).
2. Alfimov S.M. [The perspective directions of development of basic military technologies in the field of creation of control systems and information processing]. *Mehatronika, avtomatizacija i upravlenie – Mechatronics, automation and control*. 2008. no. 2. pp. 2–5. (In Russ.).
3. Chernousko F.L., Bolotnik N.N., Gradetsky V.G. [Mobile robots: problems of management and optimization of movements]. *Trudy XII Vserossijskogo soveshhanija po problemam upravlenija* [Proceedings of the XII Russian Meeting On Problems Of Management]. Moscow. 2014. p. 19. (In Russ.).
4. Pshikhopov V. H. *Mobil'nye roboty: problemy upravlenija i optimizacii dvizhenij* [Position and trajectory control of mobile objects]. Taganrog. TTI SFU. 2009. 183 p. (In Russ.).
5. Guzik V.F. et al. *Intellectual'noe planirovanie traektorij podvizhnyh ob'ektov v sredah s prepjatstvijami* [Intellectual planning of mobile objects trajectories in environments with obstacles]. Ed. by V.H. Pshikhopov. Fizmatlit. 2014. 350 p. (In Russ.).
6. Macek K., Petrovic I., Ivanjko E. An Approach to Motion Planning of Indoor Mobile Robots. In Proc. IEEE International Conference on Industrial Technology. 2003. pp. 969–973.
7. Stentz A et al. The Focussed D* Algorithm for Real-Time Replanning. In Proc. International Joint Conference on Artificial Intelligence. 1995. vol. 95. pp. 1652–1659.
8. Platonov A.K., Karpov I.I., Kirilchenko A.A. *Metod potencialov v zadache prokladki trassy* [Method of potential in a problem of the route laying]. M.: Preprint Instituta prikladnoj matematiki AN SSSR. 1974. 27 p. (In Russ.).
9. Pshikhopov V. H., Medvedev M.Yu. *Upravlenie podvizhnymi ob'ektami v opredelennyh i neopredelennyh sredah* [Mobile objects control in certain and uncertain environments]. M.: Nauka. 2011. 350 p. (In Russ.).
10. Pozna C., Precup R.-E., Koczy L.T., Ballagi A. Potential field-based approach for obstacle avoidance trajectories. *The IPSI BgD Transactions on Inter-net Research*. vol. 8. no. 2. 2002. pp. 40–45. (In Russ.).

11. Popel E.V. [Information processing about the field of distances in a problem of the people movement modeling]. *Perspektivy razvitiya informacionnyh tehnologij – Prospects of development of information technologies*. 2012. vol. 10. pp. 20–25. (In Russ.).
12. Scherbakov V.S., Korytov M.S. [Use of algorithms of search of a way of movement of freight by the truck crane on columns]. *Vestnik VGTU – The VGTU Vestnik*. 2009. vol. 5. pp. 37–41. (In Russ.).
13. Dijkstra E. W. A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische mathematik*. 1959. vol. 1. no. 1. pp. 269–271.
14. Bellman R. On a Routing Problem. *Quarterly of Applied Mathematics*. 1958. vol. 16. no. 1. pp. 87–90.
15. Hart P.E., Nilsson N. J. Raphael B. A. Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths. *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics*. 1968. vol. 2. pp. 100–107.
16. Hart P.E., Nilsson N.J., Raphael B. Correction to «A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths». *SIGART Newsletter*. 1972. vol. 37. C. 28–29.
17. Hagberg A., Schult D., Swart P. NetworkX Reference Release 1.11 Available at: www.media.readthedocs.org/pdf/networkx/stable/networkx.pdf. (accessed 31.01.16).
18. Kiper A.V., Stankievich T.S. [Sistem for the choice of the shortest safe route of rescue of people from the burning building in the seaport territory]. *Vestnik AGTU. Upravlenie, vychislitel'naja tehnika i informatika – The AGTU Vestnik. Management, computer facilities and informatics*. 2013. vol. 2. pp. 144–152. (In Russ.).
19. Sundetov R. N., Eslamgaliyev T.N. [Search algorithm choice justification of an optimum way with calculation of indicators of the traffic light in a city network]. *Estestvennye i matematicheskie nauki v sovremennom mire – Natural and mathematical sciences in the modern world*. 2015. vol. 5(29). pp. 133–137. (In Russ.).
20. Belyakov S.L., Belyakova M.L., Bozhenyuk A.V., Savelyeva M. N [Optimization of streams in transport systems]. *Izvestija JuFU. Tehniceskie nauki – Izvestya of SFedU. Technical science*. 2014. vol. 5(154). pp. 161–167. (In Russ.).
21. Dubovik N. N., Lavrov A.V., Nogin O. A., Tumanov V. M. [The analysis of methods of spatial navigation and trace of routes with linear restrictions]. *MNIZh – International Research Journal*. 2015. vol. 11–2 (42). pp. 35–42. (In Russ.).

Лазарев Владимир Сергеевич — магистр, Южный Федеральный Университет, аспирант. Область научных интересов: Групповое управление подвижными объектами. Число научных публикаций — 23. vlazarev@sfedu.ru; 347928, Ростовская обл., г. Таганрог, ГСП-17А, улица Шевченко, 2; р.т.: (8634) 37-16-94.

Lazarev Vladimir Sergeyevich — Magistry, SFedu, Southern Federal University. Research interests: Vehicles robot group control. The number of publications — 23. vlazarev@sfedu.ru; 347928, Rostov Region, Taganrog, GSP-17A, Shevchenko Street, 2; office phone: (8634) 37-16-94.

Агаджанов Давид Эдуардович — магистрант, Южный Федеральный Университет. Область научных интересов: Робототехника и процессы управления. tz2403@gmail.com; 347928, Ростовская обл., г. Таганрог, ГСП-17А, улица Шевченко, 2; р.т.: (8634) 37-16-94.

Agadjanov David Eduardovich — master student, SFedu, Southern Federal University. Research interests: Robotics and control. tz2403@gmail.com; 347928, Rostov Region, Taganrog, GSP-17A, Shevchenko Street, 2; office phone: (8634) 37-16-94.

Поддержка исследований. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-38-00703 мол_а.

Acknowledgements. The reported study was funded by RFBR according to the research project No.16-38-00703 мол_а.

РЕФЕРАТ

Лазарев В.С., Агаджанов Д.Э. **Использование графоаналитических методов для формирования траектории группы подвижных объектов в двумерной среде.**

Рассматривается задача формирования траекторий движения группы подвижных объектов, функционирующих в двумерной среде с неподвижными препятствиями. Для решения этой задачи можно использовать графоаналитические методы. При использовании данных методов область, в которой движутся подвижные объекты, представляется в виде графа. Каждое препятствие на пути объекта создается удалением обозначенных вершин и ребер этого графа. В качестве основы методов для формирования траектории движения подвижных объектов группы используются алгоритмы Дейкстры, Беллмана-Форда и A^* , взятые на основе анализа литературных источников как наиболее часто используемые. Поставлен эксперимент, включающий компьютерное моделирование методов формирования траектории для группы из однородных подвижных объектов и некоторого количества препятствий различной формы. Моделирование было проведено средствами среды разработки Python Shell, в частности, при использовании библиотеки networkx. Данная библиотека включает в себя функции по работе с графами, в том числе и для нахождения пути по алгоритмам Дейкстры, Беллмана-Форда и A^* . Результатами моделирования являются данные о времени движения группы подвижных объектов по траекториям, разработанным при помощи алгоритмов. Эксперимент включал 100 итераций моделирования для построения диаграмм средних значений затрачиваемого времени по каждому из алгоритмов. На основании данных результатов моделирования произведено сравнение методов, в качестве критерия использовалось время движения группы подвижных объектов. Данное сравнение позволило сделать вывод об эффективности различных методов решения задачи, заключающейся в построении траектории движения для группы подвижных объектов, и помогло выявить наиболее оптимальный из методов.

SUMMARY

Lazarev V.S., Agadjanov D.E. **Using Graphic-Analytical Methods for Robots Group Movement Trajectories Formation in the Two-Dimensional Environment.**

The problem of movement trajectories formation of a vehicle robots group, functioning in the two-dimensional environment with motionless obstacles, is considered. For the solution of this task, it is possible to use graphic-analytical methods. When using these methods, the area, in which vehicle robots move, is presented in the form of a graph. Each obstacle in a way of the object is created by the removal of nodes and edges of this graph. Dijkstra's algorithms, Bellman-Ford and A*, taken according to the analysis of references as the most often used, are used as a basis for methods of forming robots group movement trajectories. The experiment was conducted, including computer modeling of trajectory formation methods for a uniform robots group and obstacles of various forms. Modeling has been carried out by means of the Python Shell development environment, in particular, using networkx library. This library includes functions for work with columns, including for finding a way according to Dijkstra's, Bellman-Ford and A* algorithms. Results of modeling are data on time of vehicle robots group movement on trajectories developed by means of the algorithms. The experiment included 100 iterations of modeling for creation of charts of the average values of time spent by each of the algorithms. Based on these modeling results, a comparison of methods was made; the average time of vehicle robots group movement was used as a criterion. This comparison has allowed drawing a conclusion about the efficiency of various methods. In addition, this comparison has allowed revealing the most optimum of the methods.

СООТНОШЕНИЕ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ СИГНАЛОВ КАК КРИТЕРИЙ ОЦЕНКИ ФИЗИЧЕСКОЙ СКОРОСТИ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ

Мусаев А.А., Сердюков Ю.П. Соотношение неопределенности сигналов как критерий оценки физической скорости передачи информации.

Аннотация. Получено более детальное представление формулы Шеннона для определения пропускной способности канала связи. В модифицированном виде в нем учитываются параметры сигнала, как во временном, так и частотном диапазоне.

Предложена и описана новая методика расчета соотношения неопределенности для сигналов. Приведены примеры расчетов соотношения неопределенности для различных классов сигналов с использованием энергетического метода, метода моментов и с применением предложенного подхода.

Ключевые слова: потенциальная пропускная способность канала связи, формула Шеннона, физическая пропускная способность канала связи, оптимальные сигналы, соотношение неопределенности, метод моментов, энергетический метод, весовые функции.

Musaev A.A., Serdyukov Yu.P. The Uncertainty Relation Between the Signals as a Criterion for Evaluation of the Physical Data Rate.

Abstract. More detailed representation of Shannon's formula for determining the channel capacity is developed. In a modified form it takes into account the parameters of the signal in both time and frequency range. Proposed and described a new method of calculating the uncertainty relation for the signals. Examples of calculations of the uncertainty relation for different classes of signals using existing methods and proposed approach are presented.

Keywords: potential channel capacity, Shannon formula, the physical bandwidth of the communication channel, the best signals, uncertainty relation, the method of moments, the energy method, weighting functions.

1. Введение. В представленной работе рассмотрен один из аспектов проблемы повышения скорости передачи информации, как для импульсно-модулированных сигналов, что характерно для каналов связи непрерывного типа, так и для каналов связи дискретного типа, где информация представлена в цифровом виде [1]. Связано это с необходимостью использования при передаче информации сигналов, *наилучшим образом согласованных с характеристиками канала связи*. Основополагающую роль при этом играет соотношение неопределенности.

В качестве отправной точки проводимого в данной работе исследования используется определение потенциальной пропускной способности канала связи C , данное Шенноном и имеющее вид [1, 2]:

$$C = \max_{\{A\}} \frac{I_T}{T} = \max_{\{A\}} [H(\lambda) - H_y(\lambda)], \quad (1)$$

где $\{A\}$ — множество возможных методов передачи и приема. При заданных свойствах канала связи по нему может быть передано I_T — количество информации, получаемое за время T ; $H(\lambda)$ — априорная энтропия передаваемого сообщения λ за единицу времени; $H_y(\lambda)$ — средняя апостериорная энтропия в единицу времени.

Предположим, что выполняются следующие два условия:

— помеха в канале связи представляет собой белый шум с нормальным законом распределения и спектральной плотностью N_0^2 со средней мощностью P_n пропорциональной полосе пропускания канала связи Δf , т.е.:

$$P_n = N_0^2 \Delta f,$$

— средняя мощность сигнала P_s фиксирована, причем сигнал и шум статистически независимы и взаимодействуют аддитивно, пропускная способность канала связи с шириной полосы пропускания Δf отвечает выражению:

$$C = \Delta f \log_2 \left[1 + \left(\frac{P_s}{P_n} \right)_{inp} \right]. \quad (2)$$

2. Представление формулы Шеннона к виду, учитывающему характеристики канала связи и передаваемых по нему сигналов. Представим выражение (2) с учетом характеристик сигнала носителя, используя результаты, полученные в [3]. Воспользуемся таким параметром как число степеней свободы сигнала M на один отсчет (импульс) [3]. Он определяется длительностью самого сигнала Δt_s и шириной его полосы Δf_s . С учетом того факта, что передача информации по каналам связи осуществляется с использованием сигналов конечной длительности, то очевидно, что спектр сигнала не является конечной величиной. При этом время передачи одного отсчета (импульса) ограничено и не может быть больше чем время его корреляции τ_s , т.е.:

$$\Delta t_s \leq \tau_s \approx 1/2\Delta f_{es},$$

где Δf_{es} — эффективная ширина полосы частот спектра сигнала, вычисленная тем или иным способом. Тогда число степеней свободы определяется как:

$$M \approx \Delta f_{es} \Delta t_s. \quad (3)$$

Введем также параметр, характеризующий соотношение частотной полосы пропускания канала связи и ширины эффективной частотной полосы сигнала, т.е.:

$$K_{cs} = \frac{\Delta f_{es}}{\Delta f}. \quad (4)$$

Энергетическое отношение α^2 средней мощности сигнала и помехи в эффективной полосе частот занимаемой самим сигналом Δf_{es} , с учетом соотношений (3) и (4) могут быть представлены так:

$$\alpha^2 = \frac{P_s \Delta t_s \Delta f_{es}}{N_0^2 K_{cs} \Delta f_{es}} = \frac{M}{K_{cs}} \left(\frac{P_s}{P_n} \right)_{inp}.$$

На основании полученных результатов представим формулу (2) в следующем виде:

$$C = \Delta f \log_2 \left(1 + \frac{\alpha^2 K_{cs}}{\Delta f_{es} \Delta t_s} \right). \quad (5)$$

Произведение $\Delta f_{es} \Delta t_s$ представляет по своей сути соотношение неопределенности [4]. Однако в данной интерпретации оно применимо только для класса сигналов конечной длительности. Поэтому в выражении (5) заменим Δt_s на Δt_{es} , где Δt_{es} — эффективная длительность не конечного сигнала, определяемая в соответствии с методикой вычисления соотношения неопределенности. Причем

$$0 < \Delta t_{es} \leq \Delta t_s. \quad (6)$$

Таким образом, с учетом неравенства (6) имеем:

$$C_{пп} = \Delta f \log_2 \left(1 + \frac{\alpha^2 K_{cs}}{\Delta f_{es} \Delta t_s} \right) < \Delta f \log_2 \left(1 + \frac{\alpha^2 K_{cs}}{\Delta f_{es} \Delta t_{es}} \right).$$

Правую часть неравенства обозначим как:

$$C_{ph} = \Delta f \log_2 \left(1 + \frac{\alpha^2 K_{cs}}{\Delta f_{es} \Delta t_{es}} \right). \quad (7)$$

Величина C_{ph} , по сути, является некоторым видоизменением формулы Шеннона, определяющая потенциальную физическую пропускную способность канала связи и учитывающая как характеристики сигнала, так и канала связи.

Очевидно, что в современных системах передачи данных используются сигналы малой длительности. При неизменной ширине полосы пропускания канала связи уменьшение периода следования и длительности сигнала приводит к возникновению дополнительного источника ошибок связанного с так называемыми межсимвольными искажениями [5]. Из формулы (7) также следует, что пропускная способность канала связи определяется и классом используемых сигналов носителей информации, критерием оценки которых является соотношение неопределенности.

Таким образом, соотношение неопределенности позволяющее оценить эффективность того или иного класса носителей используемых при передаче информации является объективным критерием. Оно должно быть применимо для всех классов физических сигналов и давать объективную оценку.

3. Соотношение неопределенности и методы его вычисления. Существует два основных методологических подхода, обеспечивающих повышение скорости передачи информации. Первый из них относится к синтезу оптимальных сигналов, причем само понятие оптимальности определяется контекстом решаемой задачи. Другой путь связан с совершенствованием методов обработки сигналов, как на передающей, так и на приемной стороне. В настоящей статье рассматривается метод, основанный на оценке оптимальности сигналов, используемых при передаче информации [1]. Определяющей мерой такой оценки является область, занимаемая сигналом на плоскости время–частота и описываемое соотношением неопределенности [4]. На практике критерий оценки эффективности сигналов используется при проектировании аппаратуры передачи данных, обработке информации. В качестве примера можно привести публикации зарубежных и отечественных авторов [6-10].

Как правило, соотношение неопределенности основывается на вычислении произведения величин, характеризующих эффективную длительность сигнала во временной области и эффективную ширину его частотной полосы. При этом выбор метода численной оценки такого произведения зависит от класса изучаемых сигналов.

Так, например, для сигналов, у которых временные или спектральные характеристики асимптотически убывают как во временной, так и в частотной областях со скоростью меньшей, чем $1/t$ или $1/\omega$ соответственно, эффективные длительность сигнала и ширину его спектра определяют как интервал времени и диапазон частот, в которых сосредоточена заданная часть полной энергии сигнала. Обычно за такой уровень принимают значение 0,9-0,95 от полной энергии. При этом соотношение между «существенной» и «несущественной» частью энергии сигнала опирается в большей степени на практические соображения. Такой подход к оценке оптимальности сигнала получил название энергетического метода [11].

Рассмотрим его более подробно. Указанный метод сводится к нахождению (например, во временной области) эффективной длительности сигнала Δt_{es} из условия:

$$\int_{-\Delta t_{es}/2}^{\Delta t_{es}/2} s^2(t) dt = k \int_{-\infty}^{\infty} s^2(t) dt, \quad (8)$$

где $s(t)$ — описание сигнала во временной области. Через k обозначен уровень значимости существенной части от всей энергии сигнала, при этом $0 < k < 1$.

В соответствии с теоремой Парсеваля [12], аналогичное выражение вида (8) может быть записано и в частотной области:

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-\Delta\omega_{es}/2}^{\Delta\omega_{es}/2} s(\omega)^2 d\omega = \frac{k}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} s(\omega)^2 d\omega,$$

где $s(\omega)$ — спектральная характеристика сигнала $s(t)$.

Здесь и далее используется понятие круговой частоты ω , поэтому эффективную ширину спектра сигнала *обозначим* через $\Delta\omega_{es}$.

Второй метод вычисления соотношения неопределенности опирается на определение длительности сигнала и протяженности спектра, заимствованного из теории вероятностей. В литературе такой способ оценки известен как метод моментов [4]. В его основе лежит представление длительностей сигнала и ширины спектра через второй центральный момент. Обеспечение сопоставимости оценок достигается нормировкой относительно полной энергии сигнала, которая для физических сигналов конечна, т.е.:

$$\Delta t_{es}^2 = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} (t - t_0)^2 s^2(t) dt}{\int_{-\infty}^{+\infty} s^2(t) dt}, \quad (9)$$

где Δt_{es} — эффективная длительность сигнала $s(t)$; t_0 — середина сигнала $s(t)$, определяемая соотношением:

$$t_0 = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} t s^2(t) dt}{\int_{-\infty}^{+\infty} s^2(t) dt}. \quad (10)$$

Аналогично, эквивалентная ширина спектра $\Delta\omega_{es}$ выражается как:

$$\Delta\omega_{es}^2 = \frac{\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \omega^2 s^2(\omega) d\omega}{\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} s^2(\omega) d\omega}. \quad (11)$$

Заметим, что в силу независимости спектральной функции $s(\omega)$ от смещения $s(t)$ во времени, положено $\omega_0 = 0$.

Величины Δt_{es} и $\Delta\omega_{es}$ характеризуют в некотором смысле «ширину» функций $s(t)$ и $s(\omega)$. Между ними существуют определенные

отношения, выражающиеся в виде неравенства $\Delta t_{es}\Delta\omega_{es} \geq \frac{1}{2}$, которое в литературе называется соотношением неопределенности.

Вместе с тем для данного метода имеется существенное ограничение на область применения. Так конечность величины оценки произведения $\Delta t_{es}\Delta\omega_{es}$ с использованием метода моментов имеет место только в том случае, если временные и спектральные характеристики сигнала $s(t)$ отвечают требованию сходимости интегралов (9) и (11). Из анализа этих выражений следует, что для выполнения этого условия необходимо, чтобы $o[s(t)] < \frac{1}{t}$ и $o[s(\omega)] < \frac{1}{\omega}$.

Следует отметить, что метод моментов, базирующийся на соотношениях (9) и (11), может также быть интерпретирован как метод, использующий функции веса. При этом $p(t) = p(\omega) \equiv 1$ как во временной, так и в частотной областях.

4. Сравнительный анализ характеристик метода моментов и энергетического метода вычисления соотношения неопределенности. Материал данного сопоставительного анализа методов вычисления соотношения неопределенности опирается на результаты, полученные в [13]. Показано, что метод моментов не всегда приводит к получению конечной оценки. Поэтому при его проведении были использованы классы тестовых сигналов, конечных по длительности, для которых оба рассмотренных метода работоспособны. В качестве таковых используются сигналы треугольной формы. Кроме того, для энергетического метода оценки соотношения неопределенности будет дополнительно рассмотрен сигнал прямоугольной формы.

Задачей приводимого эксперимента является иллюстрация разброса расчетных значений соотношения неопределенности для различных типов сигналов и методов расчета.

Замечание 1: для энергетического метода расчета соотношения неопределенности уровень значимой энергии выбран равным 0,9.

Замечание 2: амплитуды тестовых сигналов и их длительности выбраны равными 1.

Результаты эксперименты представлены в ниже приведенной таблице 1.

Таблица 1. Сводная таблица оценок величин соотношения неопределенности для различных методов расчета

Тип сигнала	Метод расчета	
	Энергетический по уровню 0,9	Стандартный метод моментов
Гауссов	5,41	0,5
Треугольный	4,68	1,33
Прямоугольный	4,81	не определяется

Из анализа данных, приведенных в таблице 1, можно сделать следующие предварительные выводы:

1. разброс вычисляемых величин соотношения неопределенности различными методами значителен;
2. энергетический метод расчета соотношения неопределенности дает большие значения, а процедура его вычисления сложнее (она двухступенчатая);
3. метод моментов не применим для класса сигналов прямоугольной формы.

Таким образом, актуально построение метода вычисления соотношения неопределенности:

— позволяющего расширить класс сигналов, для которых оценка величина произведения $\Delta t_{es} \Delta \omega_{es}$ конечна,

— исключаяющего субъективизм в выборе значимости между «существенной» или «несущественной» частью оценки характеристик сигнала во временной и частотных областях, как это наблюдается в энергетическом методе расчета.

5. Модифицированное соотношение неопределенности. В представленной работе описывается методика вычисления соотношения неопределенности на основе метода моментов с использованием весовых функций, что позволяет расширить диапазон классов сигналов, для которых оно выражается конечным числом. Данный подход описан в [13].

Воспользуемся некоторыми понятиями теории меры [14]. Мету, характеризующую протяженность сигнала $s(t)$ во временной области, обозначим как $mes[s(t)]$. Она представляется некоторым числовым значением (не обязательно конечным), выражающим линейную протяженность сигнала на оси времени. Аналогичным образом определим меру линейной протяженности спектральной характеристики $s(\omega)$ по оси частот, обозначив ее как $mes[s(\omega)]$. Обе меры являются размерными величинами.

На основании свойств преобразования Фурье, меры линейных длительности сигнала по времени и ширины частотного спектра взаимосвязаны и определяются следующими возможными вариантами отношений:

1. длительность сигнала $s(t)$ конечна, т.е. $mes[s(t)] = const$, тогда ширина его спектра $s(\omega) \rightarrow \infty$ или $mes[s(\omega)] \rightarrow \infty$;

2. мера длительности сигнала $mes[s(t)] \rightarrow \infty$, так что его мера в частотной области $mes[s(\omega)] = const$;

3. меры длительности сигнала и ширины его спектра — неконечные величины, т.е. $mes[s(t)] \rightarrow \infty$ и $mes[s(\omega)] \rightarrow \infty$.

Следует отметить, что *случай 3* имеет место для единственного класса сигналов, а именно описываемых *гауссовской* функцией. Кроме того, варианты 1 и 2 эквивалентны в том смысле, что замена переменных ω на t или t на ω приводит их к тождественной форме, что обусловлено свойствами симметрии преобразования Фурье.

Сформулируем основные требования к весовым функциям. Они должны обладать следующими *свойствами*:

1. *учитывать связь между длительностью сигнала и шириной его спектра;*

2. *быть непрерывными функциями.*

Выражения для весовых функций во временной и в частотной областях, с учетом приведенного понятия линейной меры и их свойств, представим, соответственно, как $p(t) = p[t, T_0]$ и $p(\omega) = p[\omega, \Omega_0]$.

При этом величины T_0 и Ω_0 определим в виде:

$$T_0 = \frac{2\pi}{\text{mes}[s(\omega)]}, \quad (12)$$

$$\Omega_0 = \frac{2\pi}{\text{mes}[s(t)]}. \quad (13)$$

В качестве иллюстрации запишем весовую функцию во временной области исходя из условия $\text{mes}[s(\omega)] \rightarrow \infty$. С учетом выше изложенных соображений, данная весовая функция равна $p(t) = p[t, 0] = 1$.

Таким образом, при $T_0 = 0$ или $\Omega_0 = 0$ значения $p(t, 0) = 1$ или $p(\omega, 0) = 1$, соответственно.

Частный случай: для гауссова сигнала $T_0 = 0$ и $\Omega_0 = 0$ и соответственно, $p(t, 0) = p(\omega, 0) = 1$.

Предложенный выше подход по формированию весовых функций позволяет построить их в виде

$$p(t, T_0) = \begin{cases} 1, & |t| \leq T_0, \\ 0, & |t| > T_0; \end{cases} \quad (14)$$

и

$$p(\omega, \Omega_0) = \begin{cases} 1, & |\omega| \leq \Omega_0, \\ 0, & |\omega| > \Omega_0; \end{cases} \quad (15)$$

где T_0 и Ω_0 определяются, соответственно, соотношениями (12) и (13). Заметим, что функции веса могут иметь и другие, более сложные формы записи, отличные от представления выражениями (14) и (15), но удовлетворяющие указанным выше свойствам.

Для обеспечения размерности в модифицируемых формулах расчета эффективной длительности и ширины спектра сигнала, так же

как и в формулах (9) и (10), производится нормировка с применением введенных функций веса. Таким образом, модифицированные выражения для $\overline{\Delta t}_{es}$ и $\overline{\Delta \omega}_{es}$ будут иметь вид:

$$\overline{\Delta t}_{es}^2 = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} (t - t_0)^2 s^2(t) p(t, T_0) dt}{\int_{-\infty}^{+\infty} s^2(t) p(t, T_0) dt}; \quad (16)$$

$$\overline{\Delta \omega}_{es}^2 = \frac{\frac{1}{2\pi} \int_0^{+\infty} \omega^2 s^2(\omega) p(\omega, \Omega_0) d\omega}{\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} s^2(\omega) p(\omega, \Omega_0) d\omega}, \quad (17)$$

где $p(t, T_0)$ и $p(\omega, \Omega_0)$ определяются формулами (14) и (15).

Установим связь введенных нами величин $\overline{\Delta t}_{es}$ и $\overline{\Delta \omega}_{es}$ с величинами Δt_{es} и $\Delta \omega_{es}$ соответственно.

Замечание. Так как модуль спектра сигнала $s(\omega)$ не зависит от смещения $s(t)$ во времени можно положить в формуле (10) $t_0 = 0$. Кроме того, для упрощения дальнейших выкладок сигнал $s(t)$ считаем симметричным относительно нуля на оси времени и нормируем его таким образом, чтобы энергия равнялась единице, т.е.

$$\int_{-\infty}^{\infty} s^2(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} s^2(\omega) d\omega = 1.$$

Отметим, что введенные упрощения не сказываются на общности дальнейших результатов.

Докажем нижеследующее утверждение.

Утверждение 1. Соотношение неопределенности, найденное модифицированным и не модифицированным методом моментов связаны неравенством $\overline{\Delta t}_{es} \overline{\Delta \omega}_{es} \leq \Delta t_{es} \Delta \omega_{es}$.

Доказательство. Частный случай 1. Для гауссова сигнала верно:

$$\Delta t_s \rightarrow \infty \text{ и } \Delta \omega_s \rightarrow \infty$$

и потому в соответствии с (12) и (13) $T_0 = 0$ и $\Omega_0 = 0$ из чего следует, что

$$p(t, 0) = p(\omega, 0) = 1$$

или

$$\overline{\Delta t}_{es} = \Delta t_{es} \quad (18)$$

и

$$\overline{\Delta \omega}_{es} = \Delta \omega_{es}. \quad (19)$$

Таким образом, на основании (18) и (19) следует:

$$\overline{\Delta t_{es}} \overline{\Delta \omega_{es}} = \Delta t_{es} \Delta \omega_{es}.$$

Частный случай 2. Рассмотрим класс сигналов, у которых Δt_s конечная величина. Очевидно, что $\Delta \omega_s \rightarrow \infty$. На основании соотношения (12) и (14) следует:

$$T_0 = \frac{2\pi}{mes[s(\omega)]} = 0$$

или

$$p(t, 0) = 1$$

и потому

$$\int_{-\Delta t_s/2}^{+\Delta t_s/2} t^2 s^2(t) p(t, T_0) dt = \int_{-\Delta t_s/2}^{+\Delta t_s/2} t^2 s^2(t) dt. \quad (20)$$

В частотной области на основании формул (13) и (15) запишем:

$$\Omega_0 = \frac{2\pi}{mes[s(t)]} = \frac{2\pi}{\Delta t_s}$$

или

$$p(\omega) = \begin{cases} 1, & |\omega| \leq \Omega_0, \\ 0, & |\omega| > \Omega_0. \end{cases}$$

Из чего следует, что выполняется неравенство:

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \omega^2 s^2(\omega) p(\omega, \Omega_0) d\omega < \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \omega^2 s^2(\omega) d\omega. \quad (21)$$

Итак, *утверждение 1* доказано, т.е. $\overline{\Delta t_{es}} \overline{\Delta \omega_{es}} \leq \Delta t_{es} \Delta \omega_{es}$.

Следствие. В силу симметричности преобразования Фурье, аналогичное неравенство может быть доказано и для сигналов обладающих следующими временными характеристиками $\Delta t_s \rightarrow \infty$ и конечной шириной спектра $\Delta \omega_s$.

Итак, приведенные выше рассуждения позволили установить связь между модифицированным и стандартным методами оценки соотношения неопределенности. Доказано, что расчетная величина соотношения неопределенности полученная на основе модифицированного метода меньше, чем на основе стандартного метода моментов.

Не менее важным аспектом подтверждения эффективности описанного модифицированного метода моментов является также установление класса сигналов $s(t)$ или спектральных функций $s(\omega)$, для которых произведение $\overline{\Delta t_{es}} \overline{\Delta \omega_{es}}$ не является конечной величиной, при условии конечности их энергии.

Известно, что для классов сигналов $s(t)$, асимптотическое поведение которых отвечает условию $o[s(t)] \geq \frac{1}{t}$, стандартный метод моментов не позволяет получить конечную оценку произведения $\Delta t_{es} \Delta \omega_{es}$. Это существенно ограничивает область его применения. Аналогичное ограничение действует и для сигналов со спектральными характеристиками для которых выполняется неравенство $o[s(\omega)] \geq \frac{1}{\omega}$.

Утверждение 2. В классе сигналов с ограниченной энергией не существует сигналов, у которых $\overline{\Delta t}_{es} \overline{\Delta \omega}_{es} \rightarrow \infty$.

Замечание. Как и ранее (см. доказательство утверждения 1) для упрощения дальнейших выкладок сигнал $s(t)$ считаем симметричным относительно нуля на оси времени и нормируем его таким образом, чтобы энергия равнялась единице.

Доказательство. Допустим, что в классе сигналов с ограниченной энергией может быть построен сигнал, для которого соотношение неопределенности, найденное модифицированным методом моментов, не выражается конечным числом. Это возможно, если спектральная функция $s(\omega)$ сигнала такова, что $\overline{\Delta \omega}_{es} \rightarrow \infty$ или во временной области существует сигнал $s(t)$ для которого эффективная длительность $\overline{\Delta t}_{es} \rightarrow \infty$.

Рассмотрим первый случай. Для доказательства сформулированного утверждения достаточно установить, что:

$$\overline{\Delta \omega}_{es}^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \omega^2 s^2(\omega) p(\omega, \Omega_0) d\omega \rightarrow \infty. \quad (22)$$

Для расходимости несобственного интеграла (22) необходимо выполнения, во-первых, условия неограниченности спектральной функции $s(\omega)$ т.е. его $mes[s(\omega)] \rightarrow \infty$.

На основании свойств преобразования Фурье при $mes[s(\omega)] \rightarrow \infty$, длительность сигнала $s(t)$ конечна. Учтем также свойства весовой функции $p(\omega, \Omega_0)$. Она имеет вид:

$$p(\omega, \Omega_0) = \begin{cases} 1, & |\omega| \leq \Omega_0 \\ 0, & |\omega| > \Omega_0 \end{cases},$$

где $\Omega_0 = \frac{2\pi}{mes[s(t)]} = \frac{2\pi}{\Delta t_s}$. Таким образом, интеграл в правой части выражения (22) конечен.

Следствие. С учетом симметрии преобразования Фурье, аналогичные рассуждения для сигналов у которых $\overline{\Delta t}_{es} \rightarrow \infty$ приводят также к получению конечной оценки эффективной длительности сигнала

Поэтому не существует сигналов с ограниченной энергией, для которых величина произведения $\overline{\Delta t}_{es} \overline{\Delta \omega}_{es} \rightarrow \infty$.

Проведенные выше исследования модифицированного метода моментов и сопоставление его с классическим методом показали, что использование весовых функций в методе моментов приводит к существенному расширению класса сигналов, для которых соотношение неопределенности выражается конечным числом.

Известен класс сигналов, для которого соотношение неопределенности, найденное классическим методом моментов, дает его нижнюю границу. Эти сигналы описываются гауссовской функцией. Очевидно, что сопоставление численных значений соотношения неопределенности для этого класса сигналов и найденных как классическим, так и модифицированным методом, позволит оценить грубость последнего.

Гауссовский сигнал во временной и частотной областях имеет вид [4]:

$$s(t) = A \exp\left[\frac{-t^2}{2a^2}\right]$$

и

$$s(\omega) = A(a\sqrt{2\pi}) \exp\left[\frac{-a^2\omega^2}{2}\right].$$

Здесь A — амплитуда импульса; постоянная a имеет смысл некоторой условной длительности гауссова импульса, определяемого как 0.606 от амплитуды импульса. Не снижая общности проводимых ниже выкладок, примем в качестве упрощения значения коэффициентов $a = A = 1$. Тогда:

$$s(t) = \exp\left[\frac{-t^2}{2}\right]$$

и

$$s(\omega) = (\sqrt{2\pi}) \exp\left[\frac{-\omega^2}{2}\right].$$

Сигналы различаются между собой только на константу 2π . Заметим также, что непосредственное вычисление интегралов для определения Δt_{es} и $\Delta \omega_{es}$ дают следующие значения $\Delta t_{es} = \frac{1}{\sqrt{2}}$ и $\Delta \omega_{es} = \frac{1}{\sqrt{2}}$. Таким образом, произведение $\Delta t_{es} \Delta \omega_{es} = \frac{1}{2}$, что является нижней границей значения величины соотношения неопределенности, найденного классическим методом моментов.

Найдем нижнюю границу значения соотношения неопределенности для гауссовского сигнала в случае расчета модифицированным методом моментов.

С учетом свойств весовых функций для гауссова сигнала процедура вычисления соотношения неопределенности по формулам (16) и (17) приводит к стандартному методу моментов. Это означает, что величина произведения, вычисленная по приведенным выше формулам, равна $\overline{\Delta t_{es}} \overline{\Delta \omega_{es}} = 0,5$.

Таким образом, нижняя граница оценки соотношения неопределенности для гауссова сигнала, *вычисленная модифицированным методом*, не отличается от аналогичной оценки, найденной стандартным методом.

Ниже приведена таблица 2 с примерами расчета соотношения неопределенности модифицированным методом для различных типов сигналов.

Таблица 2. Дополнительная сводная таблица оценок расчетных величин соотношения неопределенности для различных методов расчета

Тип сигнала	Метод расчета		
	Энергетический по уровню 0,9	Стандартный метод моментов	Модифицированный метод моментов
Гауссов	5,41	0,5	0,5
Треугольный	4,68	1,33	1,1
Прямоугольный	4,81	не определяется	0,61

Замечание. При определении оценок величин соотношения неопределенности проводились для сигналов с заданными параметрами, а именно: их длительности и амплитуды соответственно равны 1.

Очевидно, что несмотря на простую форму весовых функций, их характеристики определяются свойствами самого сигнала, т.е. от их эффективной длительности и ширины спектра. Описанный метод адаптивен к свойствам сигнала и применим к классам сигналов с ограниченной энергией.

6. Заключение. В настоящей работе получено представление соотношения Шеннона, позволяющее оценить потенциальную физическую пропускную способность канала связи с учетом ряда параметров, как самого канала связи, так и сигналов передаваемых по нему. Показано, что одним из факторов, влияющих на пропускную способность канала связи, являются классы сигналов используемых для передачи информации. Их выбор опирается на соотношение неопределенности.

Проведен анализ методов расчета соотношения неопределенности. Описан метод расчета соотношения неопределенности на основе метода моментов с использованием весовых функций, зависящих от свойств сигнала во временной и частотной областях. Предложенный метод применим для сигналов конечной энергии.

Литература

1. *Скляр Б.* Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение // М.: Вильямс. 2003.1104 с.
2. *Шувалов В.П.* Прием сигналов с оценкой их качества // М.: Связь. 1979. 237 с.
3. *Новоселов О.Н., Фомин А.Ф.* Основы теории и расчета информационно-измерительных систем // М.: Машиностроение. 1980. 280 с.
4. *Гоноровский И.С.* Радиотехнические цепи и сигналы: учебник для вузов // М.: Дрофа. 2006. 719 с.
5. *Васильев К.К., Глушков В.А., Дормидонтов А.В., Нестеренко А.Г.* Теория электрической связи: учебное пособие // Ульяновск: УлГТУ. 2008. 452 с.
6. Shi J., Liu X., Zhang N. On uncertainty principles for linear canonical transform of complex signals via operator methods // *Signal, Image and Video Processing*. 2014. vol. 8(1). pp. 85–93.
7. Dang P., Deng G.T., Qian T. A Tighter Uncertainty Principle for Linear Canonical Transform in Terms of Phase Derivative // *IEEE Transactions on Signal Processing*. 2013. vol. 61. pp. 5153–5164.
8. Dang P., Deng G.T., Qian T. A sharper uncertainty principle // *Journal of functional analysis*. 2013. vol. 265. pp. 2239–2266.
9. *Agaskar A. Lu Y.M.* A spectral graph uncertainty principle // *IEEE Trans. on Inform. Theory*. 2013. vol. 59. no. 7. pp. 4338–4356.
10. *Захарченко В., Пак О.В., Максименко В.И., Васильев А.Ф.* Формулировка принципа неопределенности при стробоскопической обработке сигналов // *Известия вузов России. Радиоэлектроника*. 2012. Вып. 4. С. 3–5.
11. *Зюко А.Г.* Теория электрической связи // М.: Радио и связь. 1998. 433 с.
12. *Эдвардс Р.* Ряды Фурье в современном изложении. Том 1 // М.: Мир. 1985. 264 с.
13. *Мусаев А.А., Сердюков Ю.П.* Обобщенное соотношение неопределенности для сигналов // *Известия Санкт-Петербургского Государственного технологического университета*. 2015. № 30(56). С. 66–70.
14. *Зорич В.А.* Математический анализ. Часть 2 // М.: Наука. 1984. 640 с.
15. *Харди Г., Литтлвуд Дж., Полиа Г.* Неравенства // М.: ИИЛ. 1948. 456 с.

References

1. Sclyar B. *Cifrovaya svyas. Teoreticheskie osnovy i practicheskoe primeneniye* [Digital communications. Theoretical bases and practical application]. M.: Wiliams. 2003. 1104 p. (In Russ.).
2. Shuvalov V.P. *Priem signalov c otenkoy ih kachestva* [Receiving signals with the evaluation of their quality]. M.: Svyas. 1979. 237 p. (In Russ.).
3. Novoselov O.N., Fomin A.F. *Osnovi teorii i rascheta informacionno-izmeritelnih system* [Fundamentals of the theory and calculation of information and measuring systems]. M.: Mashinostroenie. 1980. 280 p. (In Russ.).
4. Gonorovski I.S. *Radiotekhnicheskie cepi i signaly: uchebnik dlya vusov* [Radio Circuits and Signals: Textbook for high schools]. M.: Drofa. 2006. 719 p. (In Russ.).
5. Vasilyev K.K., Glushkov V.A., Dormidontov A.V., Nesterenko A.G. *Teoriya electriceskoy svyasi: Uchebnoe posobie* [Theory of electrical communication: a training manual]. Ulyanivsk: UISTU. 2008. 452 p. (In Russ.).
6. Shi J., Liu X., Zhang N. On uncertainty principles for linear canonical transform of complex signals via operator methods. *Signal, Image and Video Processing*. 2014. no. 8(1). p. 85–93.
7. Dang P., Deng G.T., Qian T. A Tighter Uncertainty Principle for Linear Canonical Transform in Terms of Phase Derivative. *IEEE Transactions on Signal Processing*. 2013. vol. 61. pp. 5153–5164.

8. Dang P., Deng G.T., Qian T. A sharper uncertainty principle. *Journal of functional analysis*. 2013. vol. 265. pp. 2239–2266.
9. Agaskar A., Lu Y.M. A spectral graph uncertainty principle. *IEEE Trans. on Inform. Theory*. 2013. vol. 59. no. 7. pp. 4338–4356.
10. Zaharchenko V.D., Pak O.V., Maksimenco V.I., Vasiljev A.F. [The formulation of the uncertainty principle with the stroboscopic signal processing]. *Izvestiya vusov. Radioelektronika – Journal of Instrument Engineering*. 2012. no 4, pp. 3–5. (In Russ.).
11. Zyuko A.G., Kloviskiy D.D., Korgik V.I. *Teoriya elektricheskoi svyazi* [Theory of electrical communication]. M.: Radio and Communications. 1998. 433 p. (In Russ.).
12. Edwards R. *Ryady Furie v sovremennon izlozhenii* [Fourier series in today's presentation]. Vol. 1. M.: Mir. 1985. 264 p. (In Russ.).
13. Musaev A.A., Serdyukov Ju.P. [The generalized uncertainty relation for signals]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta – Bulletin of the Saint Petersburg State Institute of Technology*. 2015. no. 30(56). pp. 66–70. (In Russ.).
14. Zorich V.A. *Matematicheskiiy analys* [Mathematical analysis]. Part 2. M.: Nauka. 1984. 640 p. (In Russ.).
15. Hardy G., Littlewood J., Polia G. *Neravenstva* [Inequalities]. M.: ILL. 1948. 456 p. (In Russ.).

Мусаев Александр Азерович — д-р техн. наук, профессор, ведущий научный сотрудник лаборатории информационных технологий в системном анализе и моделировании, Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН), декан факультета информационных технологий и управления, Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), научный консультант, ОАО Специализированная инжиниринговая компания «Севзапмонтажавтоматика». Область научных интересов: прикладная статистика, анализ данных, прогнозирование. Число научных публикаций — 220. amusaev@technolog.edu.ru; 14-я линия В.О., д. 39, Санкт-Петербург, 199178; р.т.: +7-(812)-494-9323, Факс: +7(812)350-1113.

Musaev Alexander Azerovich — Ph.D., Dr. Sci., professor, leading researcher, laboratory of IT in System Analysis and Modeling of St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of Russian Academy of Sciences (SPIIRAS), dean of IT and control systems department, St. Petersburg State Technological Institute (technical university), expert, public corporation Specialized Engineering Company "Sevzapmontageautomatica". Research interests: data analysis, complicated dynamic processes prognosis and control, stochastic chaos systems. The number of publications — 220. amusaev@technolog.edu.ru; 39, 14-th Line V.O., St. Petersburg, 199178, Russia, SPIIRAS; office phone: +7-(812)-494-9323, Fax: +7 (812)350-1113.

Сердюков Юрий Павлович — д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры медицинской информатики и физики, Северо-Западный государственный медицинский университет имени И. И. Мечникова (СЗГМУ им. И.И. Мечникова). Область научных интересов: обработка и передача информации, теория сигналов, спектральный анализ. Число научных публикаций — 73. serdyukov_yu@mail.ru; ул. Кирочная, 41, Санкт-Петербург, 191015; р.т.: +7(812) 5431953.

Serdyukov Yuri Pavlovich — Ph.D., Dr. Sci., associate professor, professor of medical informatics and physics department, Mechnikov North-West State Medical University. Research interests: processing and information transfer, theory of signals, spectral analysis. The number of publications — 73. serdyukov_yu@mail.ru; 41, Kirochnaya Str., St. Petersburg, 191015, Russia; office phone: +7(812) 5431953.

РЕФЕРАТ

Мусаев А.А., Сердюков Ю.П. **Соотношение неопределенности сигналов как критерий оценки физической скорости передачи информации.**

Проведен анализ пропускной способности канала связи в соответствии с определением данным Шенноном. Показано, что в нем не учитывается ряд характеристик, как самого сигнала, так и канала связи в частотной области. Именно это и явилось стимулом к его преобразованию и придания этому соотношению более практическую направленность.

Получено более детальное представление формулы Шеннона для определения пропускной способности канала связи. В модифицированном виде в нем учитываются параметры сигнала, как во временном, так и частотном диапазоне. Учитывается также эффективность использования частотной полосы канала связи.

Полученная оценка по своей сути является оценкой физической пропускной способностью канала связи на базе соотношения Шеннона.

Одной из составляющих введенного модифицированного соотношения для пропускной способности канала связи по Шеннону является соотношение неопределенности.

Для повышения достоверности полученного результата проведен анализ известных методов расчета соотношения неопределенности. Выявлены их недостатки и определена область их применения в практике. Предложена и описана новая методика расчета соотношения неопределенности для сигналов, которая, собственно, и должна использоваться при проведении вычислений соотношения неопределенности.

Приведены примеры расчетов соотношения неопределенности для различных классов сигналов с использованием энергетического и метода моментов и в том числе с применением предложенного метода.

Показано что для гауссовского сигнала оценка величины соотношения неопределённости найденных модифицированным и стандартным методом моментов совпадают.

SUMMARY

Musaev A.A., Serdyukov Yu.P. **The Uncertainty Relation Between the Signals as a Criterion for Evaluation of the Physical Data Rate.**

The analysis of channel capacity in accordance with the definition according to Shannon. It is shown that it ignores certain characteristics of both the signal and the communication channel in the frequency domain. That is what was the incentive for some of its transformation and make it more action-oriented relationship.

We get more detailed understanding of Shannon's formula for determining the channel capacity. In a modified form it takes into account the parameters of the signal in both time and frequency range. Also takes into account efficient use of the frequency band of the communication channel. This estimate is essentially an assessment of the physical capacity of the communication channel on the basis of the ratio of the Shannon.

One of the components introduced to the modified ratio of the communication channel Shannon is the uncertainty relation. To improve the reliability of the results analyzed known methods for calculating the uncertainty relation. Revealed their weaknesses and identify areas of their application in practice.

Proposed and described a new method of calculating the uncertainty relation for the signals that actually should be used during the calculation of the uncertainty relation.

Examples of calculations of the uncertainty relation for different classes of signals using the energy and the method of moments, including with the use of the proposed method. It is shown that, for a Gaussian signal estimate of the uncertainty relation, and found a modified standard method of moments coincide.

БАТЕНКОВ К.А.

СИНТЕЗ ДЕТЕРМИНИРОВАННЫХ НЕЛИНЕЙНЫХ ДИСКРЕТНЫХ ОТОБРАЖЕНИЙ НЕПРЕРЫВНЫХ КАНАЛОВ СВЯЗИ

Батенков К.А. Синтез детерминированных нелинейных дискретных отображений непрерывных каналов связи.

Аннотация. Формально описаны нелинейные детерминированные дискретные отображения непрерывных каналов связи на основе функциональных рядов Вольтерра. Оценка сложности реализации нелинейных дискретно-аналогового и аналого-дискретного преобразований с заданными степенью нелинейности и размерностью сигналов демонстрирует значительную вычислительную сложность дискретно-аналогового и аналого-дискретного преобразований. Предложена структурная схема нелинейных дискретно-аналогового и аналого-дискретного преобразований на основе функциональных рядов.

Ключевые слова: непрерывный канал связи, дискретное отображение непрерывных каналов связи, оператор, ряд Вольтерра, функциональный ряд.

Batenkov K.A. Synthesis of Deterministic Nonlinear Discrete Mappings of Continuous Channel.

Abstract. Deterministic nonlinear discrete mappings of continuous channel are formally derived on basis of functional Volterra series. Nonlinear discrete-continuous and continuous-discrete transform development complexity estimate with specified level of nonlinearity and signal dimension is displayed significant discrete-continuous and continuous-discrete transform computational complexity. Nonlinear discrete-continuous and continuous-discrete transform block diagram on basis of functional Volterra series is proposed.

Keywords: continuous channel, discrete mappings of linear continuous channel, operator, Volterra series, functional series.

1. Введение. Возможность представления входного и выходного пространственно-временных сигналов в виде бесконечного ряда некоррелированных случайных функций не позволяет точно описывать процессы в канале связи, поскольку практическая реализация осуществима лишь для конечного числа слагаемых. Однако в большинстве случаев полезный сигнал изменяется существенно медленнее, чем помеха, либо имеет какую-либо локализацию, выражающуюся в различиях их статистических свойств. В результате в каноническом разложении пространственно-временного сигнала на выходе канала связи можно ограничиться некоторым числом членов ряда, дающих с определенной степенью точности описание входного сигнала. При этом либо число, либо последовательность коэффициентов разложения входного и искаженного стохастическим каналом связи выходного сигналов оказываются несогласованными в смысле точности их аппроксимации, что приводит к необходимости одновременного учета

ошибок приближения как на входе, так и на выходе канала связи. Очевидно, что с точки зрения среднеквадратической ошибки аппроксимации пространственно-временных сигналов на входе и выходе канала связи конечным рядом ответом на данный вопрос служит какая-нибудь форма канонического представления [1]. Однако при синтезе систем связи критерии в основном направлены на точность воспроизведения передаваемого сигнала, то есть задачи синтеза трактуются как задачи принятия статистических решений, показателями качества которых являются те или иные степени схожести переданного сообщения и вынесенного решения [2]. Следовательно, разложение в ряд должно рассматриваться с позиции точного воспроизведения передаваемых сигналов на приемной стороне, а не с точки зрения точности аппроксимации передаваемых и принимаемых сигналов. Произвольность выбора базисных функций в ограниченном каноническом разложении позволяет подбирать их таким образом, чтобы обеспечить в некотором смысле точность приема сигнала. Другие же способы конечномерного представления входных и выходных сигналов (например, разложение Карунена-Лоэва, различного рода системы ортогональных функций) делают возможным лишь выбор наиболее лучших представителей из заданного класса функций [3].

В целом же достаточность корреляционных свойств выходного пространственно-временного сигнала для его представления в виде канонического разложения скрывает в себе и серьезный недостаток [4]. В данном случае фиксируется класс функций, придающих коэффициентам соответствующего разложения свойство некоррелированности, что с одной стороны делает возможным более простое описание дальнейших преобразований этих коэффициентов [5], а с другой — не только не обеспечивает их независимости в наиболее общих случаях негауссовских процессов, но и потенциально снижает качество синтезируемой системы, так как сокращает вариативность получаемых решений [6]. Следовательно, в общей постановке (негауссовские процессы) задача синтеза должна формулироваться без введения ограничений на класс функций или же свойства коэффициентов разложения. Даже независимость коэффициентов разложения не может гарантировать оптимальность по определенному критерию синтеза. Таким образом, дискретное отображение непрерывного канала связи должно основываться на разложениях типа [7] с конечным числом членов ряда, в которых базисные функции вычисляются в соответствии с критерием оптимальности воспроизведения передаваемой информации (рисунк 1).

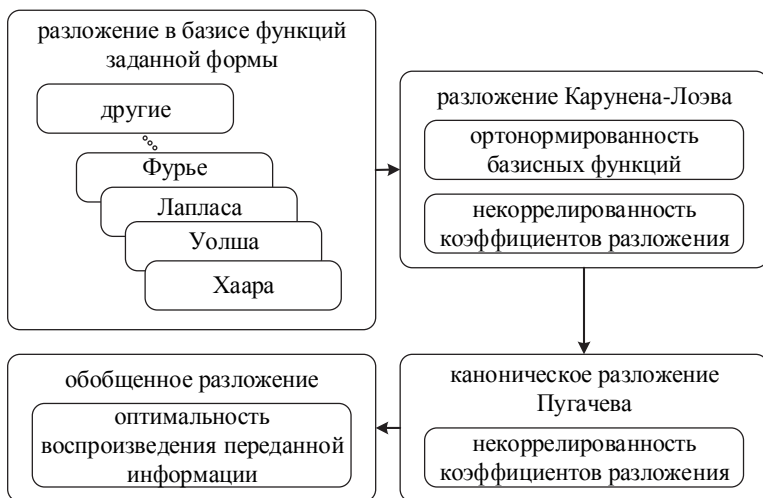


Рис. 1. Типы разложений, используемых для дискретного отображения непрерывного канала связи

2. Формальное описание нелинейных детерминированных дискретных отображений непрерывных каналов связи на основе функциональных рядов Вольтерра. Следует также отметить, что преобразования из конечномерного пространства в бесконечномерное Φ и обратно Φ' [8] оказываются линейными, поскольку удовлетворяют свойству однородности и принципу суперпозиции [9]. Разумно предположить, что в более общем случае данные отображения должны быть нелинейными, а их представление в виде подобных рядов с ограниченным числом членов по существу является только частным случаем. Как упоминалось ранее, наиболее общее описание нелинейных преобразований можно получить на основе рядов Вольтерра типа [10]. Однако при этом следует учесть, что в каноническом виде такой ряд определяет нелинейные преобразования между бесконечномерными пространствами, а дискретно-аналоговое Φ и аналого-дискретное Φ' преобразования задают отношения между конечномерными и бесконечномерными пространствами. Таким образом, необходимо несколько видоизменить ряды Вольтерра путем представления сигналов на соответствующих конечномерных концах в виде рядов из взвешенных дельта-функций, то есть сигналы на входе и выходе аналого-дискретного преобразователя можно записать в непрерывном виде как следующие суммы [11]:

$$x(t_j, \mathbf{r}_j) = \sum_{k_j=1}^N x_{k_j} \delta(k_j - t_j) \delta(t_j \mathbf{1}_{n_a} - \mathbf{r}_j), \quad j = \overline{1, \infty}, \quad (1)$$

$$x'(t', \mathbf{r}') = \mathbf{H} \{x(t, \mathbf{r})\} = \sum_{k=1}^{N'} x'_k \delta(k - t') \delta(t' \mathbf{1}_{n_b} - \mathbf{r}'), \quad (2)$$

где $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_N)^T$, $\mathbf{x}' = (x'_1, x'_2, \dots, x'_{N'})^T$ — векторы на входе и выходе дискретного канала связи (на входе дискретно-аналогового и выходе аналого-дискретного преобразователя) размерности N и N' , соответственно; $\mathbf{1}_n$ — единичный вектор размерности n ; n_a, n_b — число измерений пространства на входе и выходе непрерывного канала связи соответственно.

При этом постоянная составляющая $h_0(t', \mathbf{r}')$ считается равной нулю как при описании дискретно-аналогового, так и аналого-дискретного преобразований, а кроме того, весовые функции $h_i(t', \mathbf{r}', t_1, \dots, t_i, \mathbf{r}_1, \dots, \mathbf{r}_i)$, $i = \overline{1, \infty}$ (ядра Вольтерра) трактуются в смысле некоторых функций (базисных или несущих), то есть, по сути, являются системными характеристиками, но не канала, а дискретно-аналогового и аналого-дискретного преобразователей и обозначаются $\varphi_i(t, \mathbf{r}, t_1, \dots, t_i, \mathbf{r}_1, \dots, \mathbf{r}_i)$ и $\varphi'_i(t, \mathbf{r}, t_1, \dots, t_i, \mathbf{r}_1, \dots, \mathbf{r}_i)$ соответственно. Использование непрерывного вида сигналов на входе дискретно-аналогового преобразователя (1), а также учет нелинейности, не превышающей величины N_a (число членов ряда Вольтерра ограничено данным значением), и замена переменных делают возможным следующее представление:

$$x(t, \mathbf{r}) = \sum_{i=1}^{N_a} \int_{\Omega_{t_1}} \dots \int_{\Omega_{t_i}} \int_{\Omega_{\mathbf{r}_1}} \dots \int_{\Omega_{\mathbf{r}_i}} \left\{ \prod_{j=1}^i \sum_{k_j=1}^N x_{k_j} \delta(k_j - t_j) \delta(t_j \mathbf{1}_{n_a} - \mathbf{r}_j) \right\} \times \\ \times \varphi_i(t, \mathbf{r}, t_1, \dots, t_i, \mathbf{r}_1, \dots, \mathbf{r}_i) dt_1 \dots dt_i d\mathbf{r}_1 \dots d\mathbf{r}_i.$$

Раскрытие произведения, перегруппировка слагаемых внутри него, а также использование фильтрующего свойства дельта-функции трансформирует нелинейное дискретно-аналоговое преобразование к следующему виду:

$$x(t, \mathbf{r}) = \sum_{i=1}^{N_a} \left[\sum_{k_1=1}^N \sum_{k_2=1}^N \dots \sum_{k_i=1}^N \left\{ \prod_{j=1}^i x_{k_j} \right\} \varphi_i(t, \mathbf{r}, k_1, \dots, k_i, k_1 \mathbf{1}_{n_a}, \dots, k_i \mathbf{1}_{n_a}) \right]. \quad (3)$$

Отсюда следует важное условие осуществимости нелинейного дискретно-аналогового преобразования, выражающееся в обязательном превышении или по крайней мере равенности размерности сигналов на входе дискретно-аналогового преобразователя N степени его нелинейности N_a , то есть $N_a \leq N$. В обратном случае ($N_a > N$) произведения в фигурной скобке (3) не существуют, что означает идентичность дискретно-аналогового преобразования с нелинейностью большей N_a дискретно-аналоговому преобразованию с нелинейностью N_a .

Следует также заметить, что вследствие свойства коммутативности операции умножения (то есть $\prod_{j=1}^i x_{k_j} = \prod_{j'=1}^i x_{k'_{j'}}$, даже при условии, что $\exists k_j \neq k'_{j'}$) число суммируемых базисных функций можно существенно сократить. Количество одинаковых произведений соответствует числу перестановок упорядоченного множества индексов сигнала на входе дискретно-аналогового преобразователя $\{k_j\}$, $j = \overline{1, i}$, $k_j < k_{j'}$ | $j < j'$, $j' = \overline{1, i}$, а само данное множество перестановок целесообразно обозначить как P_i , каждый элемент которого $P_{i,p} = \{k_{j_p}\}$, $j_p = \overline{1, i}$, $p = \overline{1, i!}$, $i = \overline{1, N_a}$ представляет собой уникальную перестановку исходного упорядоченного множества. Следовательно, базисные функции дискретно-аналогового преобразования являются функциями только временных и пространственных выходных координат, так как входные координаты дискретны и имеют следующий вид:

$$\varphi_{k_1, \dots, k_i}(t, \mathbf{r}) = \sum_{\{k_{j_p}\} \in P_i} \varphi_i(t, \mathbf{r}, k_1, \dots, k_i, k_1 \mathbf{1}_{n_a}, \dots, k_i \mathbf{1}_{n_a}), \quad (4)$$

где число элементов множества перестановок P_i равно числу всех возможных перестановок, то есть $i!$ [12]. Перегруппировка слагаемых в (3) и использование (4) приводит к формуле нелинейного дискретно-аналогового преобразования в виде:

$$x(t, \mathbf{r}) = \sum_{i=1}^{N_a} \left[\sum_{k_1=1}^N \sum_{k_2=k_1}^N \dots \sum_{k_i=k_{i-1}}^N \left\{ \prod_{j=1}^i x_{k_j} \right\} \varphi_{k_1, \dots, k_i}(t, \mathbf{r}) \right]. \quad (5)$$

Для описания оператора нелинейного дискретно-аналогового преобразования Φ' также следует использовать непрерывный вид сигналов, но на выходе аналого-дискретного преобразователя (2). Учет нелинейности, не превышающей величины N_b (число членов ряда Вольтерра ограничено данным значением), и замена переменных делают возможным следующее представление:

$$\begin{aligned} & \sum_{k=1}^{N'} x'_k \delta(k-t') \delta(t' \mathbf{1}_{n_b} - \mathbf{r}') = \\ & = \sum_{i=1}^{N_b} \int_{\Omega_{r'_1}} \dots \int_{\Omega_{r'_i}} \dots \int_{\Omega_{r'_i}} \dots \int_{\Omega_{r'_i}} \left\{ \prod_{j=1}^i x'(t'_j, \mathbf{r}'_j) \right\} \times \\ & \times \varphi'_i(t', \mathbf{r}', t'_1, \dots, t'_i, \mathbf{r}'_1, \dots, \mathbf{r}'_i) dt'_1 \dots dt'_i d\mathbf{r}'_1 \dots d\mathbf{r}'_i. \end{aligned}$$

Использование свойства дельта-функции отличия от нуля только в случае равенства нулю аргумента позволяет представить выражение для координат сигнала на выходе аналого-дискретного преобразователя в виде:

$$\begin{aligned} x'_k & = \sum_{i=1}^{N_b} \int_{\Omega_{r'_1}} \dots \int_{\Omega_{r'_i}} \dots \int_{\Omega_{r'_i}} \dots \int_{\Omega_{r'_i}} \left\{ \prod_{j=1}^i x'(t'_j, \mathbf{r}'_j) \right\} \times \\ & \times \varphi'_i(k, k \mathbf{1}_{n_b}, t'_1, \dots, t'_i, \mathbf{r}'_1, \dots, \mathbf{r}'_i) dt'_1 \dots dt'_i d\mathbf{r}'_1 \dots d\mathbf{r}'_i, \quad k = \overline{1, N'}. \end{aligned}$$

Естественно, что в отличие от дискретно-аналогового преобразования соотношения между размерностью выходного сигнала N' и степенью нелинейности аналого-дискретного преобразования N_b оказываются произвольными. Следует также заметить, что равенства между размерностями сигналов на входе дискретно-аналогового N и выходе аналого-дискретного N' преобразователей, а также между степенями нелинейности дискретно-аналогового N_a и аналого-дискретного N_b преобразований также являются необязательными, то есть в общем случае $N \neq N'$ и $N_a \neq N_b$. Следовательно, единственным ограничением на данные величины остается условие осуществимости нелинейного дискретно-аналогового преобразования ($N_a \leq N$).

Таким образом, базисные функции аналого-дискретного преобразования являются функциями временных и пространственных входных координат, так как выходные координаты дискретны, и подобные функции имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \varphi'_{i,k}(t'_1, \dots, t'_i, \mathbf{r}'_1, \dots, \mathbf{r}'_i) &= \\ &= \varphi'_i(k, k\mathbf{1}_{n_b}, t'_1, \dots, t'_i, \mathbf{r}'_1, \dots, \mathbf{r}'_i), \quad i = \overline{1, N_a}, \quad k = \overline{1, N^i}. \end{aligned}$$

На основе этого выражения нелинейное аналого-дискретное преобразование преобразуется к форме:

$$\begin{aligned} x'_k &= \sum_{i=1}^{N_b} \int_{\Omega_{r'_1}} \dots \int_{\Omega_{r'_i}} \int_{\Omega_{r'_i}} \dots \int_{\Omega_{r'_1}} \left\{ \prod_{j=1}^i x'(t'_j, \mathbf{r}'_j) \right\} \times \\ &\times \varphi'_{i,k}(t'_1, \dots, t'_i, \mathbf{r}'_1, \dots, \mathbf{r}'_i) dt'_1 \dots dt'_i d\mathbf{r}'_1 \dots d\mathbf{r}'_i, \quad k = \overline{1, N^i}. \end{aligned} \quad (6)$$

3. Оценка сложности реализации нелинейных детерминированных дискретных отображений непрерывных каналов связи на основе функциональных рядов. Следует отметить, что по сравнению с (3) выражение (5) содержит значительно меньшее количество слагаемых, что бесспорно упрощает процедуру реализации нелинейного дискретно-аналогового преобразования. При этом число элементов сумм соответствует количеству базисных функций дискретно-аналогового преобразования N_φ , зависимость которого (количества) от параметров дискретно-аналогового преобразователя и делает возможным оценку сложности реализации нелинейного дискретно-аналогового преобразователя с заданными степенью нелинейности и размерностью сигналов. Так, каждая сумма по k_j в (3) содержит N элементов:

$$N'_{\Sigma_{k_j}} = N, \quad j = \overline{1, i}.$$

В результате все суммы по k_j имеют N^i членов как число размещений с повторениями:

$$N'_{\Sigma_{k_1}} = N^i.$$

Тогда количество слагаемых в сумме по i , соответствующее числу базисных функций дискретно-аналогового преобразования N'_φ , вычисляется как сумма геометрической прогрессии N_a элементов со знаменателем и первым членом равными N , то есть:

$$N'_\varphi = \sum_{i=1}^{N_a} N \cdot N^{i-1} = \frac{N(N^{N_a} - 1)}{N - 1}. \quad (7)$$

В (5) же крайняя правая сумма по k_i имеет только

$$N_{\Sigma_{k_i}} = k_{i-1} + 1 = C_{k_{i-1}+1}^1$$

элементов как число сочетаний без повторов $C_b^a = \frac{b!}{a!(b-a)!}$, $a \leq b$, $a, b = \overline{0, \infty}$ [12], по k_{i-1} :

$$N_{\Sigma_{k_{i-1}}} = \sum_{k_{i-1}=0}^{k_{i-2}} C_{k_{i-1}+1}^1 = C_{k_{i-2}+2}^2$$

членов в соответствии с формулой для сумм биномиальных коэффициентов [13]. Следовательно по индукции сумма по k_1 содержит:

$$N_{\Sigma_{k_1}} = \sum_{k_1=0}^{N-1} C_{k_1+i-1}^{i-1} = C_{N+i-1}^i \quad (8)$$

слагаемых. В итоге количество элементов в сумме по i вычисляется как число сочетаний из N_a+N по N :

$$N_{\varphi} = \sum_{i=1}^{N_a} C_{N+i-1}^i = C_{N_a+N}^N \cdot \quad (9)$$

Таким образом, в (3) количество элементов сумм (7) показательно зависит от степени нелинейности дискретно-аналогового преобразования N_a и полиномиально (с показателем степени N_a) от разности входного сигнала N , то есть:

$$N'_{\varphi} \approx N^{N_a}, \quad N \gg 1.$$

В (5) же зависимости числа слагаемых подобны, однако величина масштабирующего коэффициента отлична от единицы и зависит от степени нелинейности дискретно-аналогового преобразования N_a . Так, использование приближенной формулы Стирлинга [12] и сокращение подобных множителей преобразует выражение для числа слагаемых (9) в (5) к виду:

$$N_{\varphi} \approx \frac{(N_a + N)^{N_a + N + 1/2}}{N_a^{N_a + 1/2} N^{N + 1/2} \sqrt{2\pi}} \cdot \quad (10)$$

Деление числителя и знаменателя на $N^{N_a+N+1/2}$, внесение обратной величины этого значения в выражение внутри скобок, сокращение и применение свойства произведения показательных функций с одинаковыми основаниями трансформируют данное выражение в следующую форму:

$$N_\varphi \approx \frac{(N_a/N+1)^{N_a+1/2} (N_a/N+1)^N N^{N_a}}{N_a^{N_a+1/2} \sqrt{2\pi}}.$$

Применение следствия второго замечательного предела при $N \gg 1$, а также приближенное равенство единице первого выражения в скобках, так как $N_a/N \rightarrow 0$, приводят к асимптотическому равенству:

$$N_\varphi \approx \frac{e^{N_a}}{\sqrt{2\pi N_a^{N_a+1/2}}} N^{N_a}, \quad N \gg 1, \quad (11)$$

которое доказывает полиномиальную зависимость числа базисных функций дискретно-аналогового преобразования N_φ от достаточно больших размерностей сигналов на входе дискретно-аналогового преобразователя N с показателем степени, соответствующим степени нелинейности N_a , и масштабирующим множителем $\frac{e^{N_a}}{\sqrt{2\pi N_a^{N_a+1/2}}}$, меньшим

единицы при $N_a > 1$ и уменьшающимся по мере роста N_a , что свидетельствует о значительном сокращении числа базисных функций дискретно-аналогового преобразования, определяемых выражением (5) по сравнению с (3). Для примера, на рисунке 2 представлены полученные на основе (7), (9) и (11) зависимости количества базисных функций дискретно-аналогового преобразования N_φ от размерности сигналов на входе дискретно-аналогового преобразователя N при различных степенях нелинейности N_a . Данные графики подтверждают достаточно высокую точность приближения при $N \gg 1$, а также снижение числа слагаемых, определяемое масштабирующим коэффициентом в (11).

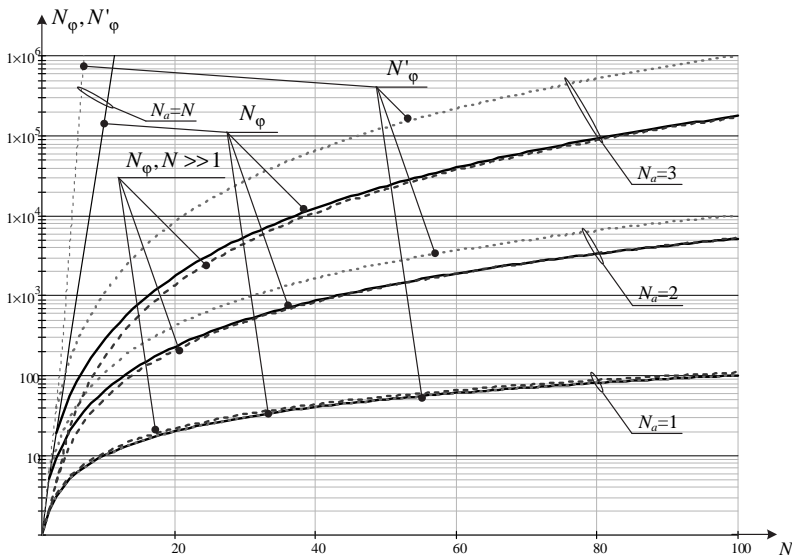


Рис. 2. Зависимости количества базисных функций дискретно-аналогового преобразования N_ϕ от размерности сигналов на входе дискретно-аналогового преобразователя N при различных степенях нелинейности N_a

При исследовании поведения числа элементов в суммах (3) и (5) при увеличении степени нелинейности дискретно-аналогового преобразования N_a следует учитывать условие осуществимости подобного типа дискретно-аналогового преобразования, то есть неравенство $N_a \leq N$. В результате при больших степенях нелинейности N_a они становятся сопоставимы с размерностями сигналов N , что выражается в форме $N_a \approx N$, $N_a \gg 1$. Таким образом (7) преобразуется к виду:

$$N_{\Sigma_i} \approx N_a^{N_a} = 2_{N_a}, \quad N_a \approx N, \quad (12)$$

известному как степенная башня порядка два, или тетрация 2_{N_a} . Количество базисных функций дискретно-аналогового преобразования определяется на основе (10) при условии $N_a \approx N$. В результате после сокращения подобных множителей данное выражение приводится к форме:

$$N_\phi \approx \frac{4^{N_a}}{\sqrt{\pi N_a}}, \quad N_a \approx N. \quad (13)$$

Таким образом, согласно (13) число базисных функций дискретно-аналогового преобразования растет даже медленнее, чем по показательному закону, в то время как в соответствии с (12) увеличение числа слагаемых подчиняется гипероператорному закону с высотой два, значительно превосходящему показательный по скорости нарастания функции. Для примера на рисунке 3 представлены полученные на основе (7), (9) и (13) зависимости числа базисных функций дискретно-аналогового преобразования N_ϕ от степени нелинейности N_a при различных размерностях сигналов на входе дискретно-аналогового преобразователя N . Данные графики подтверждают достаточно высокую точность приближения при $N_a \approx N$, а также значительное снижение числа слагаемых, определяемое различием между ростом тетрации 2_{N_a} и полиномиально-показательной функции (13).

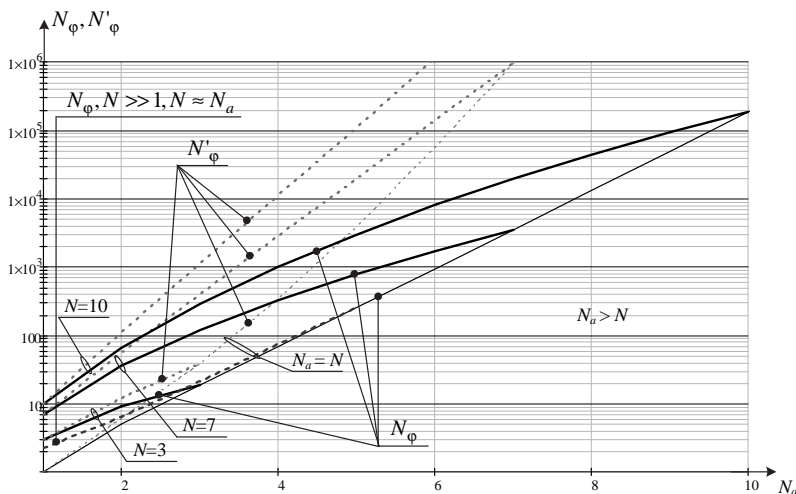


Рис. 3. Зависимости числа базисных функций дискретно-аналогового преобразования N_ϕ от степени нелинейности N_a при различных размерностях сигналов на входе дискретно-аналогового преобразователя N

Следует также отметить, что определенное число базисных функций дискретно-аналогового преобразования N_ϕ в операторе (9) задает максимально возможное их количество, поскольку в общем случае возможно использование меньшего числа членов ряда (5) вплоть до всего одного. Именно поэтому формулы (9), (11) и (13) позволяют вычислять верхние границы сложности нелинейного дискрет-

но-аналогового преобразования, причем последние две используют достаточно простые степенные зависимости в отличие от первой, требующей вычисления факториалов, что не всегда оказывается возможным. Данное обстоятельство оказывается в ряде случаев довольно критичным при реализации алгоритмов дискретно-аналогового преобразования программно-аппаратными средствами.

Число же базисных функций аналого-дискретного преобразования (аналог количества базисных функций дискретно-аналогового преобразования N_Φ) определяется как произведение размерности сигналов на выходе аналого-дискретного преобразователя N' на степень его нелинейности N_b :

$$N_\Phi = N' N_b . \quad (14)$$

Именно данное соотношение и задает аналитическую модель сложности реализации нелинейного аналого-дискретного преобразования с заданной степенью нелинейности и размерности сигналов. Несмотря на их малое по сравнению с базисными функциями дискретно-аналогового преобразования количество, имеющее линейную зависимость как от размерности сигналов на выходе аналого-дискретного преобразователя, так и от степени его нелинейности, сложности операций нелинейных дискретно-аналогового и аналого-дискретного преобразований оказываются сопоставимыми. В первую очередь данное обстоятельство обусловлено увеличенным количеством переменных в функциях аналого-дискретного преобразования порядка нелинейности большего двух по сравнению с дискретно-аналоговыми.

Снижение числа базисных функций аналого-дискретного преобразования вполне возможно, даже вплоть до одной, поэтому (14) определяет верхнюю границу их количества. Однако в этом случае, подобно ситуации с нелинейным дискретно-аналоговым преобразователем, сужается класс исследуемых операторов аналого-дискретных преобразований. В то же время снижение сложности аналого-дискретного преобразования допустимо на основе учета свойств входящих в оператор функционалов. Так, все данные функционалы являются $\{i(n'+1)\}$ -линейными, поскольку по каждой из пространственных или временной координатам они являются линейными [14]. Кроме того, подобные функционалы оказываются также и однородными со степенью i по каждой из координат при фиксированных остальных,

что предполагает возможность их представления с симметричными ядрами в рамках определенных координат [14]. В результате функционалы рассматриваются как регулярные однородные, в которых регулярность следует трактовать как симметричность базисных функций $\varphi'_{i,k}(t'_1, \dots, t'_i, \mathbf{r}'_1, \dots, \mathbf{r}'_i)$ относительно переменных t'_1, \dots, t'_i , описывающих временную координату, при всех $\mathbf{r}'_1, \dots, \mathbf{r}'_i$, описывающих пространственные координаты, а также относительно переменных $r'_{j,1}, \dots, r'_{j,i}$, $j = \overline{1, n'}$, описывающих j -ю пространственную координату, при фиксированных t'_1, \dots, t'_i , $r'_{j,1}, \dots, r'_{j,i}$, $j \neq j'$, $j' = \overline{1, n'}$, $\mathbf{r}'_1, \dots, \mathbf{r}'_i$, описывающих временную и остальные пространственные координаты. Таким образом, сам оператор нелинейного аналого-дискретного преобразования (6) образует функциональный полином степени N_b при нулевых начальных условиях [14]. Использование же свойства симметричности базисных функций аналого-дискретного преобразования позволяет определять их вид только для части области определения, граница которой задается осью симметрии — $t'_1 \leq t'_2 \leq \dots \leq t'_i$, $\mathbf{r}'_1 \leq \mathbf{r}'_2 \leq \dots \leq \mathbf{r}'_i$. Естественно, что вследствие однородности функционалов в (6) возможна произвольная нумерация как пространственных, так и временных переменных. Для оставшейся области определения значения базисных функций аналого-дискретного преобразования вычисляются из условия симметрии:

$$\varphi'_{i,k}(P'_{i,p}) = \varphi'_{i,k}(P'_{i,p'}), \quad p, p' = \overline{1, i!},$$

где $P'_{i,p} = \{t'_{j_p}, \mathbf{r}'_{j_p}\}$ — представляет собой уникальную перестановку исходного упорядоченного множества временных и пространственных переменных $\{t'_j, \mathbf{r}'_j\}$, $j = \overline{1, i}$.

Еще большей общностью обладают дискретные отображения непрерывного канала связи на базе нелинейных дискретно-аналогового (5) и аналого-дискретного (6) преобразований, но в которых базисные функции являются случайными процессами, а не детерминированными. Подобные функции задают частный случай стохастических отображений сигнала на входе дискретно-аналогового преобразователя \mathbf{x} в пространственно-временной сигнал на входе непре-

ровного канала связи $x(t, \mathbf{r})$ Φ и пространственно-временного сигнала на выходе непрерывного канала связи $x'(t', \mathbf{r}')$ в сигнал на выходе аналого-дискретного преобразователя \mathbf{x}' Φ' , задаваемых в общем случае бесконечномерными условными плотностями вероятностей:

$$\Phi: \omega_{x/\mathbf{x}}[\bar{\mathbf{x}}, \mathbf{x}; \{t_j, \mathbf{r}_j\}] = P[\bar{x}_j = x(t_j, \mathbf{r}_j) | \mathbf{x}], \quad j = \overline{1, \infty}$$

и

$$\Phi': \omega_{\mathbf{x}'/\mathbf{x}'}[\mathbf{x}', \bar{\mathbf{x}}'; \{t'_j, \mathbf{r}'_j\}] = P[\bar{x}'_j = x'(t'_j, \mathbf{r}'_j) | \mathbf{x}'],$$

где

$$\{t_j, \mathbf{r}_j\} = t_1, \mathbf{r}_1, t_2, \mathbf{r}_2, \dots, t_\infty, \mathbf{r}_\infty$$

и

$$\{t'_j, \mathbf{r}'_j\} = t'_1, \mathbf{r}'_1, t'_2, \mathbf{r}'_2, \dots, t'_\infty, \mathbf{r}'_\infty$$

обозначают упорядоченные множества временных и пространственных переменных, а $P(A/B)$ — вероятность появления события A при условии, что имеет место событие B .

Поскольку детерминированные функции являются частным случаем стохастических, то рассмотрение подобного рода базисных функций существенно расширяет класс операторов нелинейных дискретно-аналогового и аналого-дискретного преобразований и обобщает понятие разложений случайных функций в нелинейный стохастический ряд (рисунок 1). При этом разумно ожидать роста показателей качества воспроизведения переданной информации по аналогии с задачами оценки параметров, для которых рандомизированные правила принятия решений оказываются для ряда критериев наилучшими, в то время как детерминированные существенно уступают им по используемому показателю качества [15, 16].

Тип случайных базисных функций может быть также довольно произвольным. Возможно использование стохастических процессов и полей, обладающих свойством марковости, имеющих заданные значения определенных моментов, а также некоторых параметров и т. п. При этом любой тип случайности расширяет класс операторов нелинейных дискретно-аналогового и аналого-дискретного преобразований, поскольку детерминированные функции могут быть получены из стохас-

тических путем введения определенных допущений и по сути, как упоминалось ранее, являются лишь частным случаем случайных. Однако задание вида случайных функций несколько уступает в общности наиболее широкому классу случайных функций, для которых ограничения на какие-либо зависимости мгновенных значений или на параметры и функции от них не накладываются вообще. Однако подобные ограничения в ряде случаев существенно упрощают решение задачи оптимального синтеза дискретного отображения непрерывного канала связи.

4. Структурная схема нелинейных дискретно-аналогового и аналого-дискретного преобразователей на основе функциональных рядов. Для представления структурной схемы дискретного канала связи, включающего нелинейные дискретно-аналоговый и аналого-дискретный преобразователи, необходимо несколько видоизменить операторы нелинейных дискретно-аналогового (5) и аналого-дискретного (6) преобразований. Так, оператор дискретно-аналогового преобразования целесообразно рассматривать не как множество сумм произведений координат входных сигналов x_k , $k = \overline{1, N}$ на базисные функции дискретно-аналогового преобразования $\varphi_{k_1, \dots, k_i}(t, \mathbf{r})$, $i = \overline{1, N_a}$, $k_j = \overline{1, N}$, $j = \overline{1, i}$, $k_j < k_{j'}$, $j' = \overline{1, i}$, а как всего одну сумму произведений вектора различных упорядоченных произведений координат входных сигналов и вектор-функции упорядоченных базисных функций. Первоначально следует рассмотреть случай линейного дискретно-аналогового преобразования ($i = 1$), для которого в операторе дискретно-аналогового преобразования (5) сохраняется всего лишь одна сумма, достаточно просто представимая в матричном виде:

$$\sum_{k_1=1}^N x_{k_1} \varphi_{k_1}(t, \mathbf{r}) = \mathbf{x}_1^T \Phi_1(t, \mathbf{r}), \quad (15)$$

где $\mathbf{x}_1 = \mathbf{x}$ — вектор сигнала на входе дискретного канала связи (на входе дискретно-аналогового преобразователя) размерности N ; $\Phi_1(t, \mathbf{r}) = [\varphi_1(t, \mathbf{r}), \varphi_2(t, \mathbf{r}), \dots, \varphi_N(t, \mathbf{r})]^T$ — вектор базисных функций дискретно-аналогового преобразования первого порядка.

Дискретно-аналоговое преобразование исключительно второго порядка ($i = 2$) целесообразно представить в форме рекуррентного соотношения:

$$\sum_{k_1=1}^N x_{k_1} \sum_{k_2=k_1}^N x_{k_2} \varphi_{k_1, k_2}(t, \mathbf{r}) = \sum_{k_1=1}^N x_{k_1} \mathbf{x}_{1, k_1}^T \Phi_{2, k_1}(t, \mathbf{r}) = \mathbf{x}_2^T \Phi_2(t, \mathbf{r}), \quad (16)$$

где $\mathbf{x}_{1, k} = (x_k, x_{k+1}, \dots, x_N)^T$, $k = \overline{1, N}$, — усеченный вектор сигнала на входе дискретно-аналогового преобразователя размерности $N-k+1$ (очевидно, что $\mathbf{x}_1 = \mathbf{x}_{1,1} = \mathbf{x}$, а $\mathbf{x}_{1, N} = x_N$); $\mathbf{x}_2 = (x_1 \mathbf{x}_{1,1}^T, x_2 \mathbf{x}_{1,2}^T, \dots, x_N \mathbf{x}_{1,N}^T)^T$ — вектор произведений второго порядка сигнала на входе дискретно-аналогового преобразователя размерности C_{N+1}^2 согласно (8); $\Phi_{2, k}(t, \mathbf{r}) = [\varphi_{k, k}(t, \mathbf{r}), \varphi_{k, k+1}(t, \mathbf{r}), \dots, \varphi_{k, N}(t, \mathbf{r})]^T$ — усеченный вектор базисных функций дискретно-аналогового преобразования второго порядка (очевидно, что $\Phi_{2, N}(t, \mathbf{r}) = \varphi_{N, N}(t, \mathbf{r})$);

$\Phi_2(t, \mathbf{r}) = [\Phi_{2,1}^T(t, \mathbf{r}), \Phi_{2,2}^T(t, \mathbf{r}), \dots, \Phi_{2,N}^T(t, \mathbf{r})]^T$ — вектор базисных функций дискретно-аналогового преобразования второго порядка.

Дискретно-аналоговое преобразование исключительно третьего порядка ($i = 3$) также представимо в форме рекуррентного соотношения:

$$\begin{aligned} & \sum_{k_1=1}^N \sum_{k_2=k_1}^N \sum_{k_3=k_2}^N \left\{ \prod_{j=1}^3 x_{k_j} \right\} \varphi_{k_1, k_2, k_3}(t, \mathbf{r}) = \\ & = \sum_{k_1=1}^N x_{k_1} \sum_{k_2=k_1}^N x_{k_2} \mathbf{x}_{1, k_2}^T \Phi_{3, k_1, k_2}(t, \mathbf{r}) = \\ & = \sum_{k_1=1}^N x_{k_1} \mathbf{x}_{2, k_1}^T \Phi_{3, k_1}(t, \mathbf{r}) = \mathbf{x}_3^T \Phi_3(t, \mathbf{r}), \end{aligned} \quad (17)$$

где $\mathbf{x}_{2, k} = (x_k \mathbf{x}_{1, k}^T, x_{k+1} \mathbf{x}_{1, k+1}^T, \dots, x_N \mathbf{x}_{1, N}^T)^T$, $k = \overline{1, N}$, — усеченный вектор произведений второго порядка сигнала на входе дискретно-аналогового преобразователя; $\mathbf{x}_3 = (x_1 \mathbf{x}_{2,1}^T, x_2 \mathbf{x}_{2,2}^T, \dots, x_N \mathbf{x}_{2,N}^T)^T$ — вектор произведений третьего порядка сигнала на входе дискретно-

аналогового преобразователя размерности C_{N+2}^3 согласно (8); $\Phi_{3,k_1,k_2}(t,\mathbf{r}) = [\varphi_{k_1,k_2,k_2}(t,\mathbf{r}), \varphi_{k_1,k_2,k_2+1}(t,\mathbf{r}), \dots, \varphi_{k_1,k_2,N}(t,\mathbf{r})]^T$ — усеченный по третьему индексу вектор базисных функций дискретно-аналогового преобразования третьего порядка; $\Phi_{3,k_1}(t,\mathbf{r}) = [\Phi_{3,k_1,k_1}^T(t,\mathbf{r}), \Phi_{3,k_1,k_1+1}^T(t,\mathbf{r}), \dots, \Phi_{3,k_1,N}^T(t,\mathbf{r})]^T$ — усеченный по второму индексу вектор базисных функций дискретно-аналогового преобразования третьего порядка; $\Phi_3(t,\mathbf{r}) = [\Phi_{3,1}^T(t,\mathbf{r}), \Phi_{3,2}^T(t,\mathbf{r}), \dots, \Phi_{3,N}^T(t,\mathbf{r})]^T$ — вектор базисных функций дискретно-аналогового преобразования третьего порядка.

Далее по индукции дискретно-аналоговое преобразование исключительно i -го порядка имеет рекуррентный вид:

$$\sum_{k_1=1}^N \sum_{k_2=k_1}^N \dots \sum_{k_i=k_{i-1}}^N \left\{ \prod_{j=1}^i x_{k_j} \right\} \varphi_{k_1, \dots, k_i}(t, \mathbf{r}) = \mathbf{x}_i^T \Phi_i(t, \mathbf{r}), \quad i = \overline{1, N_a}, \quad (18)$$

где $\mathbf{x}_i = (x_1 \mathbf{x}_{i-1,1}^T, x_2 \mathbf{x}_{i-1,2}^T, \dots, x_N \mathbf{x}_{i-1,N}^T)^T$ — вектор произведений i -го порядка входных сигналов, каждый элемент которого является произведением упорядоченных по возрастанию координат входного сигнала, размерность данного вектора определяется на основе (8);

$\Phi_i(t, \mathbf{r}) = [\Phi_{i,1}^T(t, \mathbf{r}), \Phi_{i,2}^T(t, \mathbf{r}), \dots, \Phi_{i,N}^T(t, \mathbf{r})]^T$ — вектор базисных функций дискретно-аналогового преобразования i -го порядка.

Таким образом, оператор нелинейного дискретно-аналогового преобразования порядка N_a (5) представим в виде суммы дискретно-аналоговых преобразований меньших порядков (15)–(18):

$$x(t, \mathbf{r}) = \sum_{i=1}^{N_a} \mathbf{x}_i^T \Phi_i(t, \mathbf{r}). \quad (19)$$

Следовательно, структурную схему дискретно-аналогового преобразователя целесообразно представить в виде блоков, каждый из которых выполняет исключительно дискретно-аналоговые преобразования некоторого порядка. Между блоками же дискретно-аналоговых преобразований следует разместить устройства коммутации, формирующие векторы произведений соответствующего порядка сигнала на

входе дискретно-аналогового преобразователя. В результате структурная схема имеет вид, изображенный на рисунке 4.

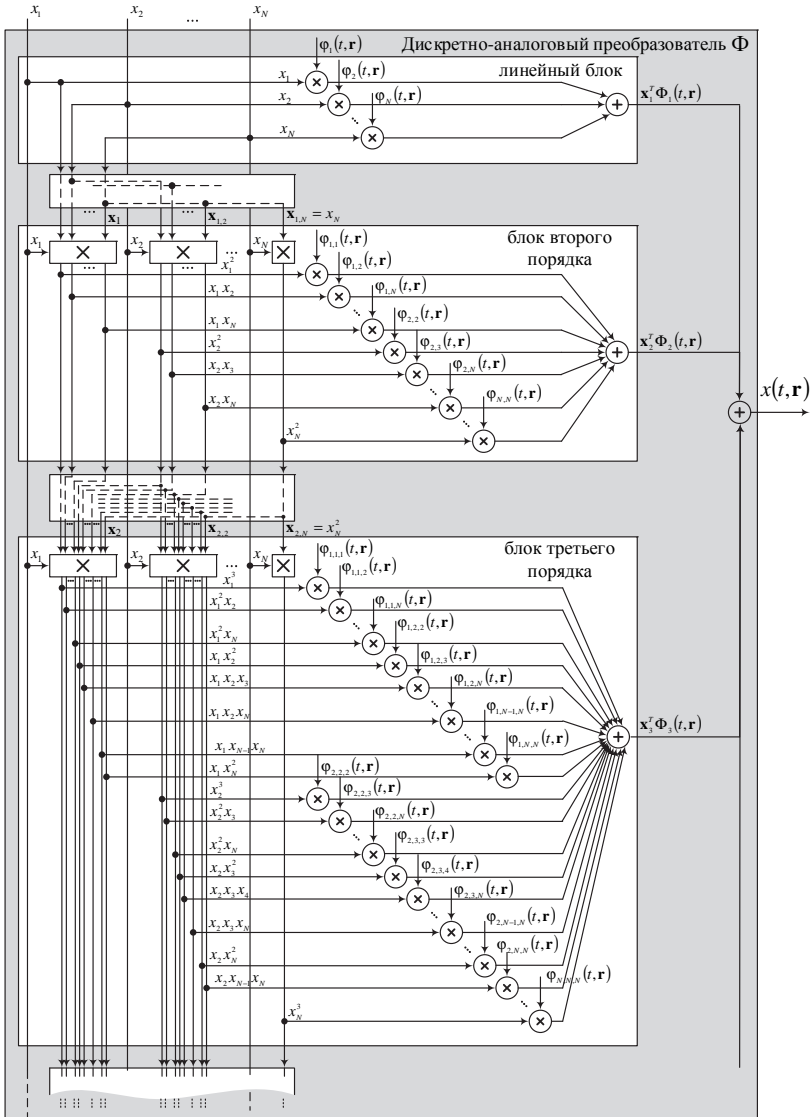


Рис. 4. Структурная схема нелинейного дискретно-аналогового преобразователя

Оператор аналого-дискретного преобразования также следует разбивать на составляющие, выполняющие аналого-дискретные преобразования определенного порядка. Так, аналого-дискретное преобразование первого порядка на основе свойства линейности операций интегрирования и суммирования представимо в виде:

$$x'_k = \int_{\Omega_{t'_1}} \int_{\Omega_{\mathbf{r}'_1}} x'(t'_1, \mathbf{r}'_1) \{ \varphi'_{1,k}(t'_1, \mathbf{r}'_1) + x'_k(t'_1, \mathbf{r}'_1) \} dt'_1 d\mathbf{r}'_1, \quad k = \overline{1, N'}, \quad (20)$$

где

$$x'_k(t'_1, \mathbf{r}'_1) = \sum_{i=2}^{N_b} \int_{\Omega_{t'_2}} \dots \int_{\Omega_{t'_i}} \int_{\Omega_{\mathbf{r}'_2}} \dots \int_{\Omega_{\mathbf{r}'_i}} \left\{ \prod_{j=2}^i x'(t'_j, \mathbf{r}'_j) \right\} \times \\ \times \varphi'_{i,k}(t'_1, \dots, t'_i, \mathbf{r}'_1, \dots, \mathbf{r}'_i) dt'_2 \dots dt'_i d\mathbf{r}'_2 \dots d\mathbf{r}'_i$$

сигнал на выходе блока аналого-дискретного преобразования второго порядка. Аналого-дискретное преобразование второго порядка имеет подобную рекуррентную форму:

$$x'_k(t'_1, \mathbf{r}'_1) = \int_{\Omega_{t'_2}} \int_{\Omega_{\mathbf{r}'_2}} x'(t'_2, \mathbf{r}'_2) \{ \varphi'_{2,k}(t'_1, t'_2, \mathbf{r}'_1, \mathbf{r}'_2) + \\ x'_k(t'_1, t'_2, \mathbf{r}'_1, \mathbf{r}'_2) \} dt'_2 d\mathbf{r}'_2, \quad (21)$$

где

$$x'_k(t'_1, t'_2, \mathbf{r}'_1, \mathbf{r}'_2) = \sum_{i=3}^{N_b} \int_{\Omega_{t'_3}} \dots \int_{\Omega_{t'_i}} \int_{\Omega_{\mathbf{r}'_3}} \dots \int_{\Omega_{\mathbf{r}'_i}} \left\{ \prod_{j=3}^i x'(t'_j, \mathbf{r}'_j) \right\} \times \\ \times \varphi'_{i,k}(t'_1, \dots, t'_i, \mathbf{r}'_1, \dots, \mathbf{r}'_i) dt'_3 \dots dt'_i d\mathbf{r}'_3 \dots d\mathbf{r}'_i$$

сигнал на выходе блока аналого-дискретного преобразования третьего порядка.

По индукции аналого-дискретное преобразование m -го порядка представима в рекуррентном виде:

$$x'_k(t'_1, \dots, t'_{m-1}, \mathbf{r}'_1, \dots, \mathbf{r}'_{m-1}) = \\ = \int_{\Omega_{t'_m}} \int_{\Omega_{\mathbf{r}'_m}} x'(t'_m, \mathbf{r}'_m) \{ \varphi'_{m,k}(t'_1, \dots, t'_m, \mathbf{r}'_1, \dots, \mathbf{r}'_m) + \\ + x'_k(t'_1, \dots, t'_m, \mathbf{r}'_1, \dots, \mathbf{r}'_m) \}, \quad m = \overline{1, N_b}, \quad (22)$$

где

$$x'_k(t'_1, \dots, t'_m, \mathbf{r}'_1, \dots, \mathbf{r}'_m) = \sum_{i=m+1}^{N_b} \int_{\Omega_{t'_{m+1}}} \dots \int_{\Omega_{t'_i}} \int_{\Omega_{\mathbf{r}'_{m+1}}} \dots \int_{\Omega_{\mathbf{r}'_i}} \left\{ \prod_{j=m+1}^i x'(t'_j, \mathbf{r}'_j) \right\} \times \\ \times \varphi'_{i,k}(t'_1, \dots, t'_i, \mathbf{r}'_1, \dots, \mathbf{r}'_i) dt'_{m+1} \dots dt'_i d\mathbf{r}'_{m+1} \dots d\mathbf{r}'_i$$

сигнал на выходе блока аналого-дискретного преобразования m -го порядка.

Также по индукции аналого-дискретное преобразование N_b -го порядка задается в форме интеграла произведения входного сигнала и базисной функции аналого-дискретного преобразования N_b -го порядка:

$$x'_k(t'_1, \dots, t'_{N_b-1}, \mathbf{r}'_1, \dots, \mathbf{r}'_{N_b-1}) = \\ = \int_{\Omega_{t'_{N_b}}} \int_{\Omega_{\mathbf{r}'_{N_b}}} x'(t'_{N_b}, \mathbf{r}'_{N_b}) \varphi'_{N_b,k}(t'_1, \dots, t'_{N_b}, \mathbf{r}'_1, \dots, \mathbf{r}'_{N_b}) dt'_{N_b} d\mathbf{r}'_{N_b}. \quad (23)$$

Таким образом, структурную схему нелинейного аналого-дискретного преобразователя целесообразно рассматривать как соединение блоков аналого-дискретных преобразований определенного порядка, каждый выход которых является входом блоков меньшего на единицу порядка нелинейности. В результате данная схема имеет вид, изображенный на рисунке 5.

Следовательно, в наиболее обобщенном структурированном виде уравнения (5) и (6), являющиеся операторами нелинейных дискретно-аналогового Φ и аналого-дискретного Φ' [7] преобразований соответственно, задают дискретное отображение непрерывного канала связи. Выражения же (19) и (20)–(23) делают возможным представление данных операций в виде структурных схем, реализующих последовательно дискретно-аналоговое и аналого-дискретное преобразования от низкого порядка нелинейности к более высокому. Следует подчеркнуть еще одно немаловажное достоинство дискретного отображения именно структурного типа. Так, в наиболее общем виде подобное отображение предполагает учет нелинейности произвольно большой степени вплоть до бесконечной. В результате и реализация, и синтез оптимальных как дискретно-аналогового, так и аналого-дискретного преобразований оказываются весьма затруднительными, за исключением случаев определенной заданной формы используемых базисных

функций. Однако данное обстоятельство является достаточно сильным ограничением, поскольку способно существенно сократить класс операторов отображения. Представление же операций в параметризованном виде (5) и (6) делает возможным как выбор заданного числа базисных функций в рамках определенного порядка нелинейности, так и введение ограничения на максимальную нелинейность оператора дискретного отображения.

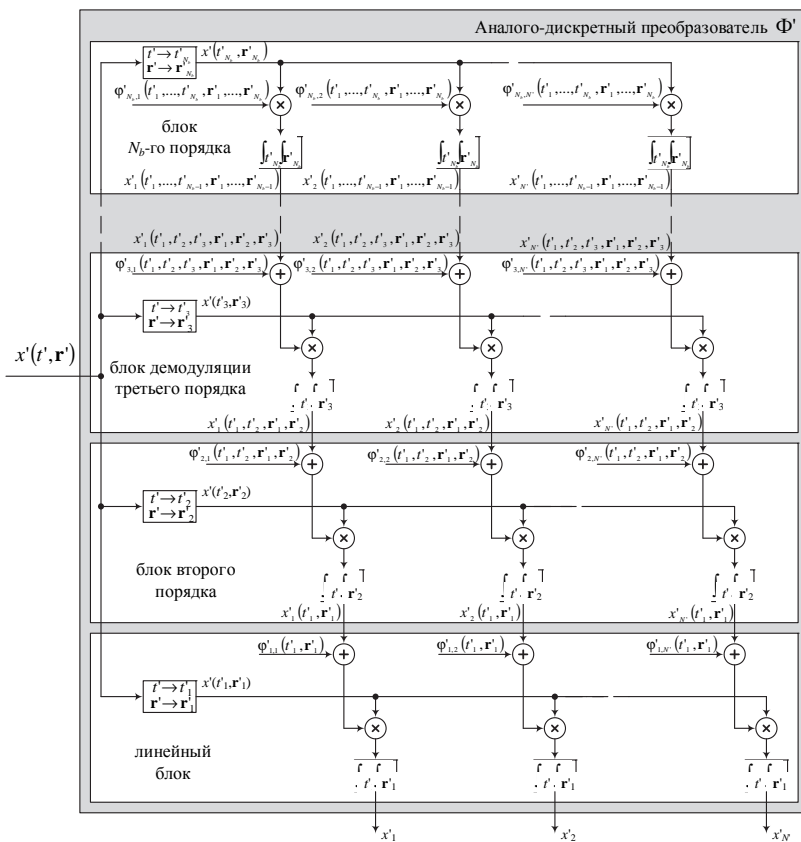


Рис. 5. Структурная схема нелинейного аналого-дискретного преобразователя

В итоге решение задач синтеза оптимальных дискретно-аналогового и аналого-дискретного преобразований возможно как в общем виде (при устремлении степени нелинейности к бесконечно-

сти), что должно быть подобно оптимальным нелинейным системам, как правило трудно реализуемым на практике, так и при достаточно произвольных ограничениях на число и порядок нелинейности базисных функций, что приводит к сравнительно простым реализациям вышеописанных процедур.

5. Заключение. Анализ существующих методов синтеза линейных дискретных отображений непрерывных каналов связи показал, что в общей постановке задача синтеза подобных отображений должна формулироваться без введения ограничений на класс функций или же свойства коэффициентов разложения в соответствии с критерием оптимальности воспроизведения передаваемой информации.

Формально описаны нелинейные детерминированные дискретные отображения непрерывных каналов связи на основе функциональных рядов Вольтерра, видоизмененных путем представления входных и выходных конечномерных сигналов в виде рядов из взвешенных дельта-функций. Оператор нелинейного дискретно-аналогового преобразования представляет собой сумму соответствующих произведений координат входных сигналов (точек сигнального созвездия) на базисные функции дискретно-аналогового преобразования и в отличие от линейного аналога включает не только линейные комбинации. Оператор нелинейного аналого-дискретного преобразования представляет собой набор корреляторов, в которых входными функциями являются соответствующие произведения входных сигналов (на выходе непрерывного канала) с различными аргументами, а опорными — многоаргументные базисные функции аналого-дискретного преобразования, и в отличие от линейного аналога включает не только линейную свертку (согласованный фильтр или коррелятор первого порядка).

Оценка сложности реализации нелинейных дискретно-аналогового и аналого-дискретного преобразований с заданными степенью нелинейности и размерностью сигналов демонстрирует значительную вычислительную сложность дискретно-аналогового и аналого-дискретного преобразований. Число базисных функций дискретно-аналогового преобразования имеет полиномиальную зависимость от достаточно больших размерностей сигналов на входе дискретно-аналогового преобразователя и растет по показательному закону при увеличении степени нелинейности дискретно-аналогового преобразования. Число же базисных функций аналого-дискретного преобразования определяется как произведение размерности сигналов на выходе аналого-дискретного преобразователя на степень его нелинейности. Однако вследствие значительного количества переменных в функциях

аналого-дискретного преобразования порядка нелинейности большего двух по сравнению с дискретно-аналоговыми сложность операций нелинейных дискретно-аналогового и аналого-дискретного преобразований оказываются сопоставимыми.

Предложена структурная схема нелинейных дискретно-аналогового и аналого-дискретного преобразований на основе функциональных рядов. В качестве ее параметров используются не только форма и количество базисных функций дискретно-аналогового и аналого-дискретного преобразований, но и степень их нелинейности. В результате существует возможность реализации нелинейных дискретно-аналогового и аналого-дискретного преобразований с заданной их вычислительной сложностью путем регулирования степени их нелинейности.

В качестве направлений дальнейших исследований целесообразно рассматривать поиск подходов к практической реализации предложенных процедур модуляции и демодуляции на базе современной микропроцессорной техники. В этой связи следует отметить необходимость трансформации обобщенных нелинейных преобразований, использующих многомерные ядра в виде непрерывных функций, в преобразования, использующие исключительно дискретные последовательности.

Литература

1. *Пузачев В.С.* Теория случайных функций и ее применение к задачам автоматического управления // М.: Физматгиз. 1962. 883 с.
2. *Тихонов В.И.* Статистическая радиотехника // М.: Советское радио. 1966. 681 с.
3. *Abdel-Hamid G.M., Abdel-Rahman S., Farrag H.G.* Performance Improvement of MIMO-OFDM Wireless Systems using PAPR Reduction Techniques // International Journal of Computer Applications. 2012. vol. 53. no. 18. pp. 7–12.
4. *Батенков К.А.* Подходы к решению задачи оптимального дискретного отображения непрерывного канала связи на основе обобщенной штрафной функции // Информационные системы и технологии. 2014. № 2(82). С. 78–83.
5. *Mazin A.M., Crosby G.V.* Reducing the peak to average power ratio of MIMO-OFDM systems // International Journal of Computer Networks & Communications (IJCNC). 2013. vol. 5. no. 3. pp. 33–51.
6. *Hwang W.* OFDM Systems for Broadband Wireless Communications in Shadowed Multipath Channels: dissertation // Kwangju Institute of Science and Technology. 2003. pp. 176.
7. *Батенков К.А.* Моделирование и синтез линейных дискретных отображений непрерывных каналов связи // Труды СПИИРАН. 2015. № 5(42). С. 112–139.
8. *Батенков К.А.* Математическое моделирование непрерывных многопараметрических каналов связи в операторной форме // Телекоммуникации. 2013. № 10. С. 2–4.
9. *Батенков К. А.* Проблема синтеза функциональных узлов дискретного канала связи по информационным критериям // Труды СПИИРАН. 2014. № 1. С. 5–23.

10. *Батенков К.А.* Дискретные отображения непрерывного канала связи на основе обобщенного ряда Фурье // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. Рязань. 2013. № 1(43). С. 12–20.
11. *Батенков К.А.* Моделирование непрерывных каналов связи в форме операторов преобразования некоторых пространств // Труды СПИИРАН. 2014. № 1. С. 171–198.
12. *Бронштейн И.Н., Семендяев К.А.* Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов // М.: Наука. 1986. 544 с.
13. *Градштейн И.С., Рыжик И.М.* Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений // М.: Наука. 1963. 1100 с.
14. *Пупков К.А., Капалин В.И., Юценко А.С.* Функциональные ряды в теории нелинейных систем // М.: Наука. 1976. 448 с.
15. *Репин В.Г., Тартаковский Г.П.* Статистический синтез при априорной неопределенности и адаптация информационных систем // М.: Советское радио. 1977. 432 с.
16. *Репин В.Г., Тартаковский Г.П., Слепокуров А.А.* Проверка многоальтернативных гипотез в условиях априорной неопределенности // Проблемы передачи информации. 1991. Т. 27. Вып. 3. С. 39–56.

References

1. Pugachev B.C. *Teorija sluchajnyh funkcij i ee primenenie k zadacham avtomaticheskogo upravlenija* [The theory of stochastic functions and its application to problems of automatic control]. М. Fizmatgiz. 1962. 883 p. (In Russ.).
2. Tihonov V.I. *Statisticheskaja radiotekhnika* [Statistical radio engineering]. М. Sovetskoe radio. 1966. 681 p. (In Russ.).
3. Abdel-Hamid G.M. Performance Improvement of MIMO-OFDM Wireless Systems using PAPR Reduction Techniques. *International Journal of Computer Applications*. 2012. Vol. 53. no 18. pp. 7–12.
4. Batenkov K.A. [Approaches to the solution of a problem of optimum discrete display of a continuous channel of communication on the basis of the generalized penalty area of function]. *Informacionnye sistemy i tehnologii – Information systems and technologies*. 2014. no 2(82). pp. 78–83. (In Russ.).
5. Mazin A.M., Crosby G.V. Reducing the peak to average power ratio of MIMO-OFDM systems. *International Journal of Computer Networks & Communications (IJNC)*. 2013. vol. 5, no. 3. pp. 33–51.
6. Hwang W. OFDM Systems for Broadband Wireless Communications in Shadowed Multipath Channels: dissertation. Kwangju Institute of Science and Technology. 2003. 176 p.
7. Batenkov K.A. [Modelling and synthesis of linear discrete mappings of continuous channels]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*. 2015. no. 5. pp. 112–139.
8. Batenkov K.A. [Mathematical modeling of continuous multiple parameter communication channels in an operator form]. *Telekommunikacii – Telecommunications*. 2013. no. 10. pp. 2–4. (In Russ.).
9. Batenkov K.A. [Problem of synthesis of functional knots of a discrete communication channel by information criteria]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*. 2014. no. 1. pp. 5–23.
10. Batenkov K.A. [Discrete displays of a continuous channel of communication on the basis of the generalized Fourier's number]. *Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta – Bulletin of Ryazan State University of Radio Engineering*. Rjazan', 2013. no 1(43). pp. 12–20. (In Russ.).

11. Batenkov K.A. [Modeling of continuous channels of communication in the form of operators of transformation of some spaces]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*. 2014. no 1. pp. 171–198. (In Russ.).
12. Bronshtejn I.N., Semendyaev K.A. *Spravochnik po matematike dlya inzhenerov i uchashchihsya vtuzov* [Mathematics handbook for engineers and higher technical school students]. M.: Nauka. 1986. 544 p. (In Russ.).
13. Gradshtejn I.S., Ryzhik I.M. *Tablicy integralov, summ, ryadov i proizvedenij* [Integral, sum, series and product tables]. M.: Nauka. 1963. 1100 p. (In Russ.).
14. Pupkov K.A., Kaplan V.I., YUshchenko A.C. *Funkcional'nye ryady v teorii nelinejnyh sistem* [Functional series in nonlinear system theory]. M.: Nauka. 1976. 448 p. (In Russ.).
15. Repin V.G., Tartakovskij G.P. *Statisticheskij sintez pri apriornoj neopredelennosti i adaptaciya informacionnyh sistem* [Statistical synthesis on prior uncertainty and information system adaptation]. M.: Sovetskoe radio. 1977. 432 p. (In Russ.).
16. Repin V.G., Tartakovskij G.P., Slepokurov A.A. [Multiple-choice hypothesis verification on prior uncertainty]. *Problemy peredachi informacii – Problems of Information Transmission*. 1991. vol. 27. no. 3. pp. 39–56. (In Russ.).

Батенков Кирилл Александрович — к-т техн. наук, сотрудник, Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации. Область научных интересов: статистическая теория связи, модели и методы обработки сигналов. Число научных публикаций — 120. pustur@yandex.ru; Приборостроительная, 35, Орел, 302034; р.т.: +7(486)254-13-25.

Batenkov Kirill Aleksandrovich — Ph.D., researcher, The Academy of Federal Security Guard Service of the Russian Federation. Research interests: statistical communication theory, models and methods of signal processing. The number of publications — 120. pustur@yandex.ru; 35, Priborostroitelnaya Street, Orel, 302034, Russia; office phone: +7(486)254-13-25.

РЕФЕРАТ

Батенков К. А. **Синтез детерминированных нелинейных дискретных отображений непрерывных каналов связи.**

Анализ существующих методов синтеза линейных дискретных отображений непрерывных каналов связи показал, что в общей постановке задача синтеза подобных отображений должна формулироваться без введения ограничений на класс функций или же свойства коэффициентов разложения в соответствии с критерием оптимальности воспроизведения передаваемой информации.

Формально описаны нелинейные детерминированные дискретные отображения непрерывных каналов связи на основе функциональных рядов Вольтерра.

Оператор нелинейного дискретно-аналогового преобразования представляет собой сумму соответствующих произведений координат входных сигналов (точек сигнального созвездия) на базисные функции дискретно-аналогового преобразования и в отличие от линейного аналога включает не только линейные комбинации.

Оператор нелинейного аналого-дискретного преобразования представляет собой набор корреляторов, в которых входными функциями являются соответствующие произведения входных сигналов (на выходе непрерывного канала) с различными аргументами, а опорными — многоаргументные базисные функции аналого-дискретного преобразования, и в отличие от линейного аналога включает не только линейную свертку (согласованный фильтр или коррелятор первого порядка).

Оценка сложности реализации нелинейных дискретно-аналогового и аналого-дискретного преобразований с заданными степенью нелинейности и размерностью сигналов демонстрирует значительную вычислительную сложность дискретно-аналогового и аналого-дискретного преобразований.

Предложена структурная схема нелинейных дискретно-аналогового и аналого-дискретного преобразований на основе функциональных рядов.

SUMMARY

Batenkov K. A. Synthesis of Deterministic Nonlinear Discrete Mappings of Continuous Channel.

Linear discrete mappings of continuous channel synthesis method analysis is indicated that in general such mappings synthesis task can be formulated without function class or expansion coefficient property conditions by optimal transmission playback criterion.

Deterministic nonlinear discrete mappings of continuous channel are formally derived on the basis of functional Volterra series.

Nonlinear discrete-continuous operator is the sum of input signal coordinate on discrete-continuous transform basis function product. It includes not only linear combinations unlike in linear analog.

Nonlinear continuous-discrete operator correlators in which input functions are input signal product and support functions are multi-argument basis functions of continuous-discrete transform. It includes not only linear convolution unlike in linear analog.

Nonlinear discrete-continuous and continuous-discrete transform development complexity estimate with specified level of nonlinearity and signal dimension is displayed significant discrete-continuous and continuous-discrete transform computational complexity.

Nonlinear discrete-continuous and continuous-discrete transform block diagram on the basis of functional Volterra series is proposed.

В.П. БУБНОВ, С.А. СЕРГЕЕВ
**НЕСТАЦИОНАРНЫЕ МОДЕЛИ ЛОКАЛЬНОГО СЕРВЕРА
АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА
ИСКУССТВЕННЫХ СООРУЖЕНИЙ**

Бубнов В.П., Сергеев С.А. Нестационарные модели локального сервера автоматизированной системы мониторинга искусственных сооружений.

Аннотация. Данная работа посвящена определению максимального возможного числа датчиков, подключаемых к одному из локальных серверов автоматизированной системы мониторинга технического состояния искусственных сооружений. В статье приводятся нестационарные вероятностные модели с детерминированным входным потоком заявок и гипердельтным распределением времени обслуживания заявок. Обосновывается применение гипердельтного распределения в имитационной модели сравнением результатов имитационного моделирования с результатами, полученными с помощью аналитической модели. На основе результатов моделирования выбирается система управления базой данных для локального сервера.

Ключевые слова: нестационарная модель, автоматизированная система мониторинга искусственных сооружений, вероятности состояний системы.

Bubnov V.P., Sergeev S.A. Non-Stationary Models of a Local Server of the Automated System for Monitoring Artificial Structures.

Abstract. This work is devoted to the determination of the maximum possible number of sensors connected to one of the local servers of the automated system for monitoring the technical condition of man-made structures. The article presents a simulation model with the time-dependent probabilistic deterministic process of receiving requests and hyperdelta requests service process. The use of hyperdelta distribution in the simulation model is substantiated by comparing simulation results with the results obtained using an analytical model. Based on the simulation results, a database management system for a local server is chosen.

Keywords: non-stationary model; an automated system for monitoring artificial structures; the probability of the system state.

1. Введение. Чтобы своевременно среагировать на опасные изменения параметров искусственных сооружений, необходимо осуществлять их мониторинг технического состояния. Проблема мониторинга искусственных сооружений рассмотрена в [1-10]. Однако в приведенных источниках рассматривались вопросы архитектуры автоматизированной системы мониторинга технического состояния искусственных сооружений (АСМИС) и использование данных, полученных от датчиков. Данная работа посвящена определению возможности подключения к системе заданного количества датчиков на основе использования нестационарных аналитических и имитационных моделей. Перегрузка либо отказ работы различных компонентов АСМИС, приводят к несвоевременной обработке

информации либо к ее потере, что в свою очередь может привести к значительным материальным потерям и даже к человеческим жертвам.

2. Исследование вероятностно временных характеристик системы АСМИС. В [6] приводится архитектура и алгоритмы работы системы для автоматизированного мониторинга технического состояния искусственных сооружений. Одним из важнейших компонентов этой системы является программно-аппаратный модуль, называемый локальным сервером. Для определения возможности реализации всех операций, связанных с технологическим циклом локального сервера, было проведено его нагрузочное тестирование с помощью специализированной программы, описанной в [11], которое показало, что уже при 4 подключенных к системе датчиках, возникают ошибки, влекущие за собой потерю значительной части данных, которые поступают от датчиков. Это приводит к несвоевременному и неточному прогнозированию и анализу ситуации на искусственном сооружении. Анализ этих ошибок показал, что они связаны с технологическими операциями взаимодействия программного обеспечения локального сервера с базой данных. В качестве базы данных использовалась SQLite. Ее особенность в том, что она не предоставляет отдельного сервиса для выполнения операций чтения и записи данных, а интегрируется в разрабатываемую программу в качестве сторонней программной библиотеки. Кроме того, в качестве хранилища данных используется единственный файл, и разработчику необходимо самому заботиться о синхронизации потоков чтения и записи данных [12]. Эта база данных была выбрана, так как она наиболее простая.

Для определения максимального числа датчиков, подключение которых к одному локальному серверу не приводило бы к перегрузкам, была разработана модель нестационарной системы обслуживания (НСО) [13].

Основные допущения:

1. К локальному серверу подключены датчики одного типа.
2. Через равные интервалы времени T_s в систему поступают данные от nd датчиков. Где nd — количество подключенных к локальному серверу датчиков. Так как датчики одного типа и заявки от всех датчиков обрабатываются непрерывно, было принято решение объединить каждую группу заявок, приходящих одновременно в единую заявку первого типа.
3. Через равные интервалы времени Tr поступает заявка второго типа, связанная с технологическим циклом синхронизации данных между локальным и удаленным сервером.

4. Важно, чтобы после одновременного поступления двух заявок второго и первого типа, они успели обслужиться до момента поступления последующей заявки.

В известных источниках [14] авторы не нашли требуемой для исследования модели.

Нестационарная имитационная модель имеет следующее обозначение Кендалла:

$$\langle \tilde{D}/\tilde{X}_7/1/n \rangle,$$

где \tilde{D} — детерминированный входной поток заявок, \tilde{X}_7 — гипердельтное распределение времени обслуживания заявок с числом этапов семь, 1 — одно обслуживающее устройство, n — число заявок, поступающих за все время моделирования, и описывается следующими параметрами:

1. Имеется одно обслуживающее устройство. Физически обслуживающим устройством является база данных.

2. $N = 2$ — количество типов заявок. Приоритет заявки типа 1 выше, чем у типа 2.

3. Заявки каждого типа поступают через одинаковые интервалы времени, присущие для каждого типа заявок.

4. $\vec{\lambda}$ — вектор интенсивности поступления заявок, причем λ_i — интенсивность поступления заявок типа i .

5. Закон распределения времени обслуживания заявок — гипердельтный. В [15-16] показаны преимущества использования гипердельтного аппроксимирующего распределения в имитационных моделях, перед использованием других распределений фазового типа.

6. $M1$ — матрица времени обслуживания заявок первого типа, имеет 2 строки, причем $M1_{1,i}$ — вероятность того, что заявка первого типа обслужится за время $M1_{2,i}$. Сумма всех элементов первой строки матрицы равна единице.

7. $M2$ — матрица времени обслуживания заявок второго типа, имеет 2 строки, причем $M2_{1,i}$ — вероятность того, что заявка второго типа обслужится за время $M2_{2,i}$. Сумма всех элементов первой строки матрицы равна единице.

8. \vec{k} — вектор количества заявок, где k_i — количество заявок типа i , поступающих в систему за все время моделирования. Умножение вектора строки \vec{k} на единичный столбец даст n .

В каждый момент времени НСО описывается следующими параметрами:

1. Вектор \vec{n} , где i -я компонента вектора определяет количество заявок типа i , находящихся в НСО в данный момент.

2. Вектор \vec{m} , где i -я компонента вектора определяет количество заявок типа i , уже получивших обслуживание и покинувших НСО.

При $nd = 4$, имеем:

$$\vec{\lambda} = \left\{ 1, \frac{1}{5} \right\};$$

$$\vec{k} = \{ 5 | 1 \}.$$

В ходе натурального эксперимента были получены начальные моменты времени обслуживания заявок первого и второго типов. С их помощью были рассчитаны параметры аппроксимирующего гипердельтного распределения специальной программой [17]. Параметры данных распределений представлены ниже:

$$M1 = \left\{ \begin{array}{c|c|c|c|c|c|c|c} 0.99 & 0.0018 & 0.0027 & 0.003 & 0.0019 & 3.43E-4 & 2.65E-5 \\ \hline 4.628E-9 & 0.137 & 0.192 & 0.265 & 0.336 & 0.41 & 0.49 \end{array} \right\};$$

$$M2 = \left\{ \begin{array}{c|c|c|c|c|c|c|c} 0.99 & 0.002 & 0.0028 & 0.0031 & 0.0016 & 1.834E-4 & 1.996E-5 \\ \hline 3.793E-8 & 0.696 & 1.0001 & 1.397 & 1.762 & 2.2458 & 2.647 \end{array} \right\}.$$

Описанная выше имитационная модель была реализована на языке программирования Java [18]. В таблице 1 приведены значения вероятности свободного состояния НСО в различные моменты времени, полученные с помощью имитационной модели.

Таблица 1. Значения вероятности свободного состояния НСО

t	2	3	4	5	6
Вероятность	1	1	1	1	0.992

В момент времени 6 значение вероятности свободного состояния системы не равно единице, так как система не всегда успевает обслужить пришедшие одновременно заявки обоих типов.

Для проверки полученных результатов была разработана аналогичная имитационной численно-аналитическая модель. Алгоритм расчета таких моделей описан в [13]. Аналитическая модель отличается от имитационной законом распределения времени обслуживания заявок, имеет следующее обозначение Кендалла:

$$\langle \tilde{D} / \tilde{M} / 1 / n \rangle,$$

и описывается следующими параметрами:

- 1) Имеется одно обслуживающее устройство;

2) $N=2$ — количество типов заявок. Приоритет заявки типа 1 выше, чем у типа 2;

3) Заявки каждого типа поступают через детерминированные интервалы времени;

4) $\vec{\lambda}$ — вектор интенсивности поступления заявок, причем λ_i — интенсивность поступления заявок типа i ;

5) Закон распределения времени обслуживания заявок — экспоненциальный;

6) $\vec{\mu}$ — вектор интенсивности обслуживания заявок, причем M_i — интенсивность обслуживания заявок типа i ;

7) \vec{k} — i -я компонента вектора, определяет количество заявок типа i , поступающих в систему за интервал моделирования.

В каждый момент времени НСО описывается следующими параметрами:

1) \vec{n}, i -я компонента вектора определяет количество заявок типа i , находящихся в НСО в данный момент;

2) \vec{m}, i -я компонента вектора определяет количество заявок типа i , уже получивших обслуживание и покинувших НСО.

Время обработки заявок в модели распределяется экспоненциально.

Для эксперимента были использованы следующие исходные данные:

$$\begin{aligned}\vec{\lambda} &= \left\{1, \frac{1}{5}\right\}; \\ \vec{\mu} &= \{3.366|3.497\}; \\ \vec{k} &= \{5|1\}.\end{aligned}$$

Описанная модель была реализована на языке программирования Java [19]. В таблице 2 приведены значения вероятности p свободного состояния НСО в различные моменты времени t , полученные с помощью аналитической модели.

Таблица 2. Значения вероятности свободного состояния НСО

t	2	3	4	5	6
Вероятность	0.965	0.961	0.9607	0.9606	0.848

При аппроксимировании гипердельтным распределением используется тринадцать начальных моментов, а при аппроксимировании экспоненциальным — только один, очевидно, что гипердельтная аппроксимация будет значительно точнее повторять свойства распределения времени обслуживания заявок каждого типа. Этот и объясняется столь значительная разница в результатах работы

моделей. Поэтому для сравнения работы обеих моделей в имитационной модели генератор случайных величин по гипердельтному закону распределения был заменен на генератор случайных величин по экспоненциальному закону распределения.

В таблице 3 приведены значения вероятности p свободного состояния НСО в различные моменты времени t , полученные с помощью имитационной модели с экспоненциальным генератором случайных величин и исходными данными такими же, как и в аналитической модели, описанной выше.

Таблица 3. Значения вероятности свободного состояния НСО

t	2	3	4	5	6
Вероятность	0.965	0.961	0.9611	0.9606	0.848

На рисунке 1 изображен график зависимости значения вероятности свободного состояния НСО от времени при 4 датчиках.

Стоит отметить, что на всех графиках шаг по сетке времени взят равным 0,1 с. Поэтому на графиках не отображено, что при поступлении новой заявки вероятность свободного состояния становится равной нулю.

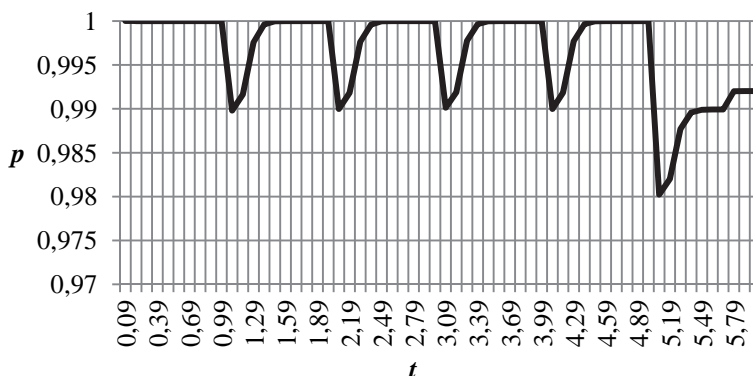


Рис. 1. График зависимости значения вероятности свободного состояния НСО от времени при 4 датчиках

Чтобы определить максимально возможное количество датчиков для такой системы был проведен ряд экспериментов с имитационной моделью. Объединив данные этих экспериментов, был построен график зависимости значения вероятности нахождения НСО в момент времени t в поглощающем состоянии от числа подключенных к ней датчиков. Данная зависимость представлена на рисунке 2.

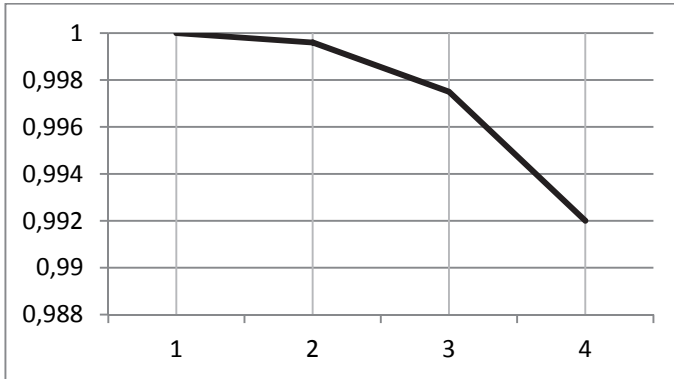


Рис. 2. Зависимость значения вероятности нахождения НСО в момент времени b в поглощающем состоянии от числа датчиков

Как видно из рисунка 2, уже при двух подключенных к локальному серверу датчиках значение вероятности того, что заявки обоих типов не успеют обслужиться к моменту поступления новой заявки, возросло. В связи с этим было принято решение сменить используемую в локальном сервере базу данных. Были проанализированы лицензионные соглашения, удобство и простота использования, скорость выполнения SQL запросов, надежность основных баз данных, и выбрана база данных PostgreSQL [20].

Для проверки работоспособности измененной системы было произведено имитационное моделирование, описанной выше модели. Ниже описаны некоторые из этих экспериментов.

Моделирование при различных значениях nd показало, что смена базы данных на PostgreSQL значительно увеличила пропускную способность системы. Результаты моделирования при малых nd не представляют интерес, поэтому ниже приведены результаты некоторых моделирований при $nd \geq 100$.

При $nd = 100$, по аналогии с предыдущим экспериментом имеем:

$$\vec{\lambda} = \left\{ 1, \frac{1}{5} \right\};$$

$$\vec{k} = \{ 5 | 1 \};$$

$$M1 = \begin{Bmatrix} 0.996 & 0.001 & 0.002 & 2.7E-4 & 1.8E-4 & 5.09E-5 & 2.3E-5 \\ 5.1E-12 & 0.047 & 0.054 & 0.069 & 0.085 & 0.103 & 0.114 \end{Bmatrix};$$

$$M2 = \begin{Bmatrix} 0.996 & 8.34E-4 & 0.001 & 6.11E-4 & 2.2E-4 & 5.4E-5 & 2.3E-5 \\ 1.2E-11 & 0.291 & 0.336 & 0.397 & 0.501 & 0.59 & 0.67 \end{Bmatrix}.$$

В таблице 4 приведены значения вероятности p свободного состояния НСО в различные моменты времени t , полученные с помощью имитационной модели.

Таблица 4. Значения вероятности свободного состояния НСО

t	2	3	4	5	6
Вероятность	1	1	1	1	1

График зависимости значения вероятности свободного состояния НСО от времени показан на рисунке 3.

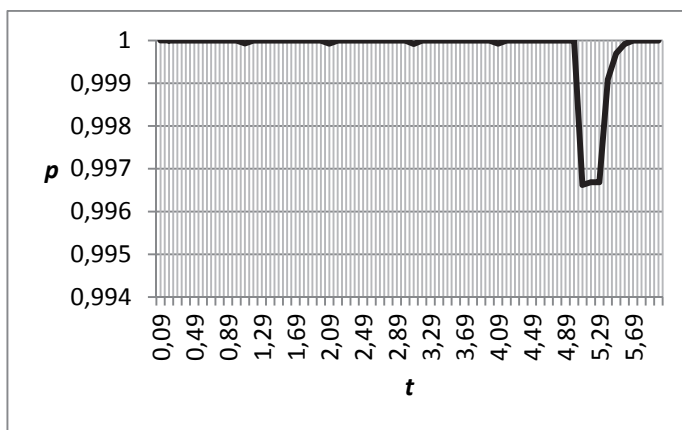


Рис. 3. График зависимости значения вероятности свободного состояния НСО от времени при 100 датчиках

При $nd = 450$, по аналогии с предыдущим экспериментом имеем:

$$\vec{\lambda} = \left\{ 1, \frac{1}{5} \right\};$$

$$M1 = \left\{ \begin{array}{c|c|c|c|c|c|c} 0,99 & 8,9E-4 & 0,0029 & 0,0037 & 0,002 & 2,7E-4 & 6,7E-5 \\ \hline 1,4E-11 & 0,175 & 0,2082 & 0,2488 & 0,2926 & 0,343 & 0,38191 \end{array} \right\};$$

$$M2 = \left\{ \begin{array}{c|c|c|c|c|c|c} 0,99 & 6,2E-4 & 0,0024 & 0,0037 & 0,0022 & 7,7E-4 & 1,4E-4 \\ \hline 5,8E-11 & 1,007 & 1,189 & 1,4176 & 1,6615 & 1,9137 & 2,1083 \end{array} \right\};$$

$$\vec{k} = \{5|1\}.$$

В таблице 5 приведены значения вероятности p свободного состояния НСО в различные моменты времени t , полученные с помощью имитационной модели.

Таблица 5. Значения вероятности свободного состояния НСО

t	2	3	4	5	6
Вероятность	1	1	1	1	0,9899

График зависимости свободного состояния НСО от времени показан на рисунке 4.

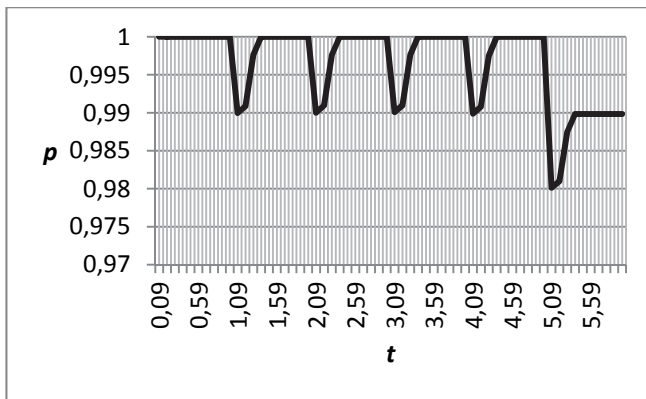


Рис. 4. График зависимости свободного состояния НСО от времени при 450 датчиках

Объединив данные проведенных экспериментов, можно построить график зависимости значения вероятности нахождения НСО в момент времени t в поглощающем состоянии от числа датчиков. Данная зависимость представлена на рисунке 5.



Рис. 5. Зависимость значения вероятности нахождения НСО в момент времени t в поглощающем состоянии от числа датчиков

Из рисунка 5 видно, что использование локального сервера с 200 подключенными к нему датчиками безопасно, при 250 датчиках

значение вероятности возникновения ошибки возрастает. Стоит отметить, что нагрузочное тестирование системы при помощи специальной программы [11] при $nd = 200$ прошло без возникновения ошибок. Кроме того, возможность подключения к локальному серверу 200 датчиков значительно превышает требования, предъявляемые к системе АСМИС в начале разработки.

3. Заключение. Приведенные в статье аналитические и имитационные модели реализованы на языке Java и зарегистрированы в Федеральном институте промышленной собственности [18, 19].

С помощью представленных аналитических и имитационных моделей решаются следующие задачи:

1) Выбор системы управления баз данных (СУБД) для системы мониторинга искусственных сооружений.

2) Определение, при выбранной СУБД и типах датчиков, предельное число датчиков, подключаемых к локальному серверу.

3) Выбор аппаратно-программной платформы для периферийных узлов АСМИС.

Литература

1. *Watanabe E., Furuta H., Yamaguchi T., Kano M.* On longevity and monitoring technologies of bridges: a survey study by the Japanese Society of Steel Construction // *Structure and Infrastructure Engineering*. 2014. vol. 10. no. 4. pp. 471–491.
2. *Li S.L., Li H., Liu Y., Lan C., Zhou W., Ou J.* SMC structural health monitoring benchmark problem using monitored data from an actual cable-stayed bridge // *Structural Control and Health Monitoring*. 2014. vol. 21. no. 2. pp. 156–172.
3. *Li A.Q., Ding Y.L., Wang H., Guo T.* Analysis and assessment of bridge health monitoring mass data—progress in research/development of “Structural Health Monitoring” // *Science China Technological Sciences*. 2012. vol. 55. no. 8. pp. 2212–2224.
4. *Spencer B. F.* Campaign Monitoring of Railroad Bridges in High-Speed Rail Shared Corridors using Wireless Smart Sensors // *Newmark Structural Engineering Laboratory*. University of Illinois at Urbana-Champaign. 2015.
5. *Брынь М.Я., Никитчин А.А., Толстов Е.Г. и др.* Геодезический мониторинг деформаций вантовых мостов на основе спутниковых технологий // *Известия Петербургского университета путей сообщения*. 2009. № 2(19). С. 120–128.
6. *Брынь М.Я., Хомоненко А.Д., Бубнов В.П., Никитчин А.А., Сергеев С.А., Новиков П.А., Титов А.И.* Программный комплекс для мониторинга деформаций особо опасных объектов // *Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы*. 2014. № 1. С. 36–41.
7. *Охтилев М.Ю., Зеленцов В.А., Соколов Б.В., Юсупов Р.М.* Методология и технология комплексной автоматизации и интеллектуализации процессов мониторинга и управления космическими средствами // *Труды 7-й российской мультиконференции по проблемам управления (УМАС-2014)*. 2014. С. 15–26.
8. *Корниенк А.А., Юсупов Р.М., Соколов Б.В., Охтилев М.Ю.* Модельно-алгоритмическое обеспечение и прототип программного комплекса мониторинга и диагностики сложного динамического объекта "подвижной состав - железнодорожная инфраструктура" в реальном времени // *IV международная научно-практическая конференция*. 2014. С. 33–41.

9. *Соколов Б.В., Юсупов Р.М., Корниенко А.А., Охтилев М.Ю.* Методологические и методические основы создания и применения интеллектуальной системы мониторинга подвижной состав - железнодорожная инфраструктура // *Материалы Третьей международной научно-практической конференции.* 2013. С. 12–20.
10. *Майданович О.В., Охтилев М.Ю., Соколов Б.В., Юсупов Р.М.* Комплексная автоматизация мониторинга состояния космических средств на основе интеллектуальных информационных технологий // *Информационные технологии.* 2011. № S10. С. 1–32.
11. *Сергеев С.А., Бубнов В.П., Бубнов В.В.* Программа для нагрузочного тестирования систем автоматизированного мониторинга // *Патент России № 201561734.* 2015.
12. Официальный сайт базы данных Sqlite. URL: <https://www.sqlite.org/> (дата обращения 18.02.2016).
13. *Бубнов В.П.* Метод расчета вероятностно-временных характеристик пребывания заявок в разомкнутой сети массового обслуживания // *Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения.* 2012. № 1(45). С. 92–96.
14. *Плотников А.М., Рыжиков Ю.И., Соколов Б.В., Юсупов Р.М.* Анализ современного состояния и тенденции развития имитационного моделирования в российской федерации (по материалам конференций «имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД)) // *Труды СПИИРАН.* 2013. № 2(25). С. 42–112.
15. *Смагин В.А., Филimoniхин Г.В.* О моделировании случайных процессов на основе гипердельтного распределения // *Автоматика и вычислительная техника.* 1990. № 5. С. 25–31.
16. *Бубнов В.П., Сафонов В.И., Сергеев С.А.* Применение гипердельтного распределения в имитационных моделях микропроцессорных систем управления и диагностики электровозов // *Вестник Всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института электровозостроения.* 2015. № 1(69). С. 39–47.
17. *Сергеев С.А., Бубнов В.П., Бубнов В.В.* Программа для расчета параметров аппроксимирующего гипердельтного распределения по методу моментов // *Патент России № 201561737.* 2015.
18. *Сергеев С.А., Бубнов В.П., Бубнов В.В.* Программа для имитационного моделирования нестационарных систем обслуживания // *Патент России № 201561735.* 2015.
19. *Сергеев С.А., Бубнов В.В., Ерёмин А.С.* Программа для расчета вероятностей состояний нестационарных систем обслуживания // *Патент России № 2014662753.* 2014.
20. Официальный сайт базы данных PostgreSQL. URL: <http://www.postgresql.org/> (дата обращения: 18.02.2016).

References

1. Watanabe E., Furuta H., Yamaguchi T., Kano M. On longevity and monitoring technologies of bridges: a survey study by the Japanese Society of Steel Construction. *Structure and Infrastructure Engineering.* 2014. vol. 10. no. 4. pp. 471–491.
2. Li S.L., Li H., Liu Y., Lan C., Zhou W., Ou J. SMC structural health monitoring benchmark problem using monitored data from an actual cable-stayed bridge. *Structural Control and Health Monitoring.* 2014. vol. 21. no. 2. pp. 156–172.
3. Li A.Q., Ding Y.L., Wang H., Guo T. Analysis and assessment of bridge health monitoring mass data—progress in research/development of “Structural Health

- Monitoring". *Science China Technological Sciences*. 2012. vol. 55. no. 8. pp. 2212–2224.
4. Spencer B.F. Campaign Monitoring of Railroad Bridges in High-Speed Rail Shared Corridors using Wireless Smart Sensors. *Newmark Structural Engineering Laboratory*. University of Illinois at Urbana-Champaign. 2015.
 5. Bryn M.YA., Nikitchin A.A., Tolstov E.G. et al. [Geodetic deformation monitoring cable-stayed bridges based on satellite technology]. *Izvestiia Peterburgskogo universiteta putei soobshcheniia – Proceedings of the St. Petersburg University of Railways*. 2009. no. 2(19). pp. 120–128. (In Russ.).
 6. Bryn M.YA., Khomonenko A.D., Bybnov V.P., Nikitchin A.A., Sergeev S.A., Novikov P.A., Titov A.I. [Software for monitoring strain especially dangerous objects]. *Problemy informacionnoi bezopasnosti. Kompiuternye sistemy – Problems of information security. Computer systems*. 2014. no. 1. pp. 36–41. (In Russ.).
 7. Ohtilev M.U., Zelencov V.A., Sokolov B.V., Yusupov R.M. [The methodology and technology of integrated automation and intellectualization of process monitoring and control of space means]. *7-ia rossiiskaia multikonferentcia po problemam upravleniia UMAS-2014* [Proceedings of the 7th Russian Multiconference on management (UMAS 2014)]. 2014. pp. 15–26. (In Russ.).
 8. Kornienko A.A. Yusupov R.M. Sokolov B.V. Okhtilev M.U. [Model-algorithmic support and prototype software for monitoring and diagnosis of complicated dynamic object "rolling stock - railway infrastructure" in realtime]. *IV mezhdunarodnaja nauchno-prakticheskaja konferentcija* [Proceedings of the IV international scientific-practical conference]. 2014. pp. 33–41. (In Russ.).
 9. Sokolov B.V. Yusupov R.M. Kornienko A.A. Okhtilev M.U. [Methodological and methodical bases of creation and application of intelligent monitoring system rolling stock - railway infrastructure]. *Treteja mezhdunarodnaja nauchno-prakticheskaja konferentcija* [Proceedings of the Third International Scientific and Practical Conference]. 2013. pp. 12–20. (In Russ.).
 10. Maidanovich O.V. Okhtilev M.U. Sokolov B.V. Yusupov R.M. [Integrated automation of monitoring the status of space assets on the basis of intelligent information technologies]. *Informacionnye tekhnologii – Information Technology*. 2011. no. S10. pp. 1–32. (In Russ.).
 11. Sergeev S.A., Bubnov V.P., Bubnov V.V. *Programma dlja nagruzochnogo testirovaniia sistem avtomatizirovannogo monitoringa* [The program for stress testing systems, automated monitoring]. Patent Rossii no. 201561734. 2015. (In Russ.).
 12. Oficialnyi sait bazy dannykh Sqlite [Official Website database Sqlite]. Available at: www.sqlite.org. (accessed: 18.02.2016). (In Russ.).
 13. Bubnov V.P. [The method of calculating the probability-time characteristics of the host applications in an open queuing network]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniia – Bulletin of the Rostov State University of Railways*. 2012. no. 1(45). pp. 92–96. (In Russ.).
 14. Plotnikov A.M. Ryzhikov U.I. Sokolov B.V. Yusupov R.M. [Analysis of current state and trends of the simulation in the Russian Federation (on materials of conferences "simulation. Theory and Practice" (IMMOD))]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*. 2013. vol. 2(25). pp. 42–112. (In Russ.).
 15. Smagin V.A., Filimonihin G.V. [About modeling random processes on the basis of the limit distribution]. *Avtomatika i vychislitelnaia tekhnika – Automation and Computer Engineering*. 1990. no. 5. pp. 25–31. (In Russ.).
 16. Bubnov V.P., Safonov V.I., Sergeev S.A. [The application of the limit distribution in the simulation model of microprocessor control systems and diagnostics of electric locomotives]. *Vestnik Vserossiiskogo nauchno-issledovatel'skogo i proektno-*

- konstruktorskogo instituta elektrovozostroeniia – Bulletin of the Russian Research and Design Institute of electric locomotive*. 2015. no. 1(69). pp. 39–47. (In Russ.).
17. Sergeev S.A., Bubnov V.P., Bubnov V.V. *Programma dlja rascheta parametrov approksimirujushhego giperdel'nogo raspredelenija po metodu momentov* [The program for calculating the parameters approximating the limit distribution of the method of moments]. Patent Rossii no. 201561737. 2015. (In Russ.).
 18. Sergeev S.A., Bubnov V.P., Bubnov V.V. *Programma dlja imitacionnogo modelirovaniya nestacionarnyh sistem obsluzhivaniya* [The program for the simulation of non-stationary systems, service]. Patent Rossii no. 201561735. 2015. (In Russ.).
 19. Sergeev S.A., Bubnov V.V., Eremin A.S. *Programma dlja rascheta verojatnostej sostojanij nestacionarnyh sistem obsluzhivaniya* [The program for the calculation of non-stationary state probabilities service systems] Patent Rossii № 2014662753. 2014.
 20. Oficialnyi sait bazy dannykh PostgreSQL [The official website for the PostgreSQL database]. Available at: www.postgresql.org. (accessed 18.02.2016). (In Russ.).

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 (ПГУПС). 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., д. 9, Санкт-Петербург, 190031, РФ; р.т.: +79052807904, Факс: +7(812)457-8606.

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.

Сергеев Сергей Александрович — аспирант кафедры информационных и вычислительных систем факультета автоматизации и интеллектуальных технологий, Петербургский государственный университет путей сообщения императора Александра I (ПГУПС). Область научных интересов: стационарные системы массового обслуживания, программные комплексы. Число научных публикаций — 12. serega_svetl@mail.ru; Московский пр., д. 9, Санкт-Петербург, 190031, РФ; р.т.: 8(911)959-53-25.

Sergeev Sergei Aleksandrovich — Ph.D. student of the informatics and computer systems department, Petersburg State Transport University. Research interests: non-stationary queueing systems, software complexes. The number of publications — 12. serega_svetl@mail.ru; 9, Moskovsky pr., Saint-Petersburg, 190031, Russia; office phone: 8(911)959-53-25.

Поддержка исследований. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 13-07-00279, 13-08-00702, 13-08-01250, 13-06-00877, 13-07-12120-офи-м), Программы фундаментальных исследований ОНИТ РАН (проект No2.11).

Acknowledgements. This research is partially supported by the RFBR (grants 13-07-00279, 13-08-00702, 13-08-01250, 13-06-00877, 13-07-12120-офи-м), and by the fundamental scientific research support ONITRAS Project No. 2.11.

РЕФЕРАТ

Сергеев С.А., Бубнов В.П. **Нестационарные модели локального сервера автоматизированной системы мониторинга искусственных сооружений.**

Для определения технического состояния искусственных сооружений на железнодорожном транспорте (мосты, тоннели, эстакады), была разработана система автоматизированного мониторинга искусственных сооружений (АСМИС). Стабильная работа такого рода систем является существенным фактором в обеспечении безопасности особо опасных объектов. Основное требование предъявляется к оперативности получения и обработки информации с датчиков системы локальным сервером. Особенности функционирования локального сервера таковы, что периодически на сервер поступает большое количество заявок на обработку информации различного типа. Время обработки заявок разного типа является случайной величиной.

Данная работа посвящена определению максимального возможного числа датчиков, подключаемых к одному из локальных серверов автоматизированной системы мониторинга технического состояния искусственных сооружений. В статье приводится имитационная нестационарная вероятностная модель с детерминированным процессом поступления заявок и гипердельтным процессом обслуживания заявок. Обосновывается применение гипердельтного распределения в имитационной модели путём сравнения результатов имитационного моделирования с результатами, полученными с помощью аналитической модели. На основе результатов моделирования определяется максимальное число датчиков, подключение которых не приведёт к перегрузке, и выбирается система управления базой данных для локального сервера АСМИС.

SUMMARY

Sergeev S.A., Bubnov V.P. **Non-Stationary Models of the Automated Monitoring System of Artificial Structures Local Server.**

To determine the technical condition of especially dangerous objects (bridges, tunnels, overpasses), the automated system for monitoring of artificial structures (ASMAS) was developed. Stable operation of such systems is an essential factor in ensuring the safety of especially dangerous objects. The main requirement is specified for the efficiency of receiving and processing information from the sensors of the local server. Functioning features of the local server are such that the server periodically receives a large number of customers to process information of various types. The amount of time it takes to process different customers is a random variable.

This paper is devoted to the determination of the maximum possible number of sensors connected to one of the local servers of the automated system for monitoring of the technical condition of artificial structures. The article presents a simulation model with time-dependent probabilistic deterministic process of receiving customers and hyper delta process of the customer processing; substantiates the use of the hyper delta distribution in the simulation model by comparing simulation results with the results obtained by using an analytical model. Based on the results determined by the simulation database management system for a local server is chosen.

В.Ф. ПЕТРОВ, А.И. ТЕРЕНТЬЕВ, С.Б. СИМОНОВ, Д.Н. КОРОЛЬКОВ, В.И.
КОМЧЕНКОВ, А.В. АРХИПКИН

ЗАДАЧИ ГРУППОВОГО УПРАВЛЕНИЯ РОБОТАМИ В РОБОТОТЕХНИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ ПОЖАРОТУШЕНИЯ

Петров В.Ф., Терентьев А.И., Симонов С.Б., Корольков Д.Н., Комченков В.И., Архипкин А.В. Задачи группового управления роботами в робототехническом комплексе пожаротушения.

Аннотация. Для решения задач группового управления РТК на различных уровнях необходима разработка аппаратуры передачи данных, к которой предъявляются повышенные требования. Рассмотрены проблемы выбора методов и алгоритмов реализации помехоустойчивых каналов связи для робототехнических комплексов специального и военного назначения тяжелого класса. Обосновано, что аппаратура передачи данных для робототехнических комплексов должна быть специализированной, строиться на основе эффективных сигнально-кодовых конструкций, использовать различные методы адаптации канала радиосвязи к изменяющимся условиям эксплуатации (помеховая обстановка, условия распространения). Рассмотрены особенности и варианты построения аппаратуры передачи данных для группового управления роботами, показаны преимущества и недостатки схем временного и частотного уплотнения каналов (абонентов).

Ключевые слова: групповое управление РТК, уровни управления, аппаратура передачи данных, помехоустойчивость, адаптивная модуляция, адаптивная мощность..

Petrov V.F, Terentev A.I., Simonov S.B., Korolkov D.N., Komchenkov V.I., Arkhipkin A.V. Problems of Group Control of Robots in the Robotic Complex of Fire Extinguishing.

Abstract. Development of the data-communication equipment with high demands imposed is necessary for solving the problems of unmanned robots group control on various levels. In this paper methods and algorithms for noise-immunity communication channel implementation are described. Substantiated that communication equipments for these channels have to be special-purpose and they have to use effective signal-code constructions which can adopt to changing environments. Features and options for multiple unmanned ground vehicles (UGV) control communications are described, advantages and disadvantages of time division multiple access and frequency division multiple access are considered.

Keywords: Communication equipment; noise-immunity; adoptive modulation and coding; adoptive power mode.

1. Введение. Одним из путей создания робототехнических комплексов (РТК) специального назначения является модернизация существующих экипажных образцов военной техники [1-4]. Именно таким образом создается РТК на базе специальной пожарной машины (СПМ). РТК СПМ состоит из пункта дистанционного управления (ПДУ) и двух дистанционной управляемых СПМ (ДУ СПМ). Для каждой ДУ СПМ разработан комплект специализированной аппаратуры, который обеспечивает дистанционное управление [5].

Управление каждой ДУ СПМ планирует оператор. Однако ДУ СПМ1 и ДУ СПМ2 могут выполнять часть функций автономно: например, движение по маршруту [6, 7].

Следует отметить, что по мере возрастания возможностей автономного функционирования объекта объем передаваемой видеoinформации между роботами и ПДУ будет сокращаться [8, 9]. Это позволит включить в единую сеть «точка-многоточка» большее количество роботов при той же пропускной способности сети [10]. Решение поставленных задач группой СПМ повысит эффективность применения РТК СПМ.

2. Уровни взаимодействия между роботами. Взаимодействие между роботами в группе может быть представлено в виде ранжированного ряда с возрастанием сложности задачи.

Уровень 0. Взаимодействие осуществляется между операторами, управляющими роботами. Централизованное управление осуществляет командир комплекса. При таком уровне сложности требования к взаимодействию между роботами не предъявляются. Данный уровень легко реализуется на практике, однако не представляет интереса с точки зрения автономного группового функционирования РТК.

Уровень 1. Данный уровень подразумевает разрешение конфликтов при автономном управлении. РТК способны генерировать предупреждения операторам при дистанционном управлении.

В качестве примеров задач этого уровня для РТК СПМ следует рассмотреть следующие:

- уступить дорогу роботу, который выполняет более приоритетную задачу;
- согласование движения при пересечении траекторий РТК;
- запрос помощи одного РТК при технических неполадках другого, например, возгорании (реализация требует расширенного информационного поля датчиков) [11];
- использование одной СПМ в качестве ретранслятора для другой СПМ, потерявшей связь с ПДУ;
- аварийная буксировка вышедшего из строя РТК.

При возрастании автономности РТК список будет дополняться новыми задачами. В качестве технических аспектов реализации этого уровня группового управления следует отметить, что РТК должны обмениваться своими координатами и положением в пространстве (особенно актуально для крупногабаритных комплексов). Обмен информацией для этого может быть организован через центральную точку (ПДУ) по структуре «точка-многоточка».

Однако для наземных РТК, работающих на пересеченной местности, всегда существуют зоны радиотени, в которых связь с ПДУ может быть нарушена. Поэтому одним из надежных решений задачи обмена информацией является использование между роботами средств связи, построенных по принципу mesh сети в зоне непосредственного соприкосновения РТК.

Решение обозначенных на этом уровне задач может выполняться РТК автономно, однако наличие развитой информационной сети позволяет оператору на ПДУ контролировать происходящее и при необходимости вносить коррективы в действия роботов.

Уровень 2. Совместное решение задач группой однотипных роботов. На этом уровне взаимодействие РТК осуществляется путем копирования действий друг друга. Например, РТК могут выполнять следующие задачи:

— движение в колонне (здесь ведущий робот следит за тем, чтобы ведомый не отстал, а ведомый выполняет задачу движения за впереди идущим);

— обеспечения ретрансляции для связи с ПДУ (каждый РТК выполняет роль ретранслятора и является узлом mesh сети);

— определение целей для пожаротушения и выдача целеуказаний, полученных в результате работы системы технического зрения группы роботов;

— сбор и обмен информацией об обнаруженных препятствиях при движении в точку назначения.

Уровень 3. Полностью автономное решение поставленной задачи группе РТК по принципу целеуказания и критерия решения задачи. С точки зрения группового управления это наиболее перспективный уровень.

Следует отметить, что расширение комплекса специализированными роботами, которые решают вспомогательные функциональные задачи, позволяет повысить эффективность функционирования группы РТК. Так, например, использование робота ретранслятора радиосигнала на базе квадрокоптера позволит расширить область функционирования РТК СПМ. А применение робота разведчика для поиска источников возгорания на базе квадрокоптера, позволит получить еще один информационный канал о новых возгораниях.

Одним из ключевых моментов в групповом управлении является наличие развитой информационной сети, обеспечивающей быстрый и качественный обмен информацией.

3. Требования к аппаратуре передачи данных. К аппаратуре передачи данных (АПД) для робототехнических комплексов военного назначения (РТК ВН) предъявляются повышенные требования по помехоустойчивости, скрытности, надежности связи, электромагнитной совместимости (ЭМС) и имитостойкости (устойчивости к структурным помехам).

Как правило, специфика применения РТК ВН, в особенности тяжелого класса, диктует следующие требования к аппаратуре передачи данных:

- высокие (десятки Мбит/сек) скорости передачи информации в прямом канале;

- асимметрия прямого и обратного канала по скорости передачи информации;

- минимальные (не более 100 мкс) задержки в канале (работа в режиме реального времени);

- возможность работы в сложной электромагнитной обстановке, при наличии естественных и преднамеренных помех (помехозащищенность), в условиях многолучевого распространения сигналов;

- гибкость и адаптивность канала связи по скорости передачи информации, спектральной эффективности и выходной мощности; наличие режимов адаптации по излучаемой мощности, пропускной способности и частоте излучения в зависимости от помеховой обстановки и дальности управления;

- возможность обеспечивать максимально-скрытную радиосвязь (разведзащищенность);

- поддержка режимов «ретрансляция» и «точка-многоточка» для обеспечения группового управления;

- устойчивая работа в условиях пересеченной местности при отсутствии прямой видимости;

- возможность переключения системы в рамках частотных диапазонов;

- другие требования, специфичные для РТК ВН конкретного типа и назначения.

Перечисленные требования в большей или меньшей степени характерны для всех РТК ВН тяжелого класса. Одновременное выполнение указанных требований проблематично, а нахождение разумного компромисса между ними и практическая реализация указанных требований является актуальной научно-технической задачей.

Даже поверхностный анализ перечисленных требований к АПД для РТК ВН показывает, что практическая реализация такой

аппаратуры невозможна на базе открытых стандартов связи (Bluetooth, Wi-Fi, WiMAX, DVB-T и др.), использующих открытые протоколы. Серьезными препятствиями к использованию открытых стандартов связи, являются:

- низкая информационная безопасность канала связи (криптостойкость);

- низкая имитостойкость (устойчивость к имитационной помехе, имеющей одинаковую с полезным сигналом структуру, что затрудняет ее обнаружение);

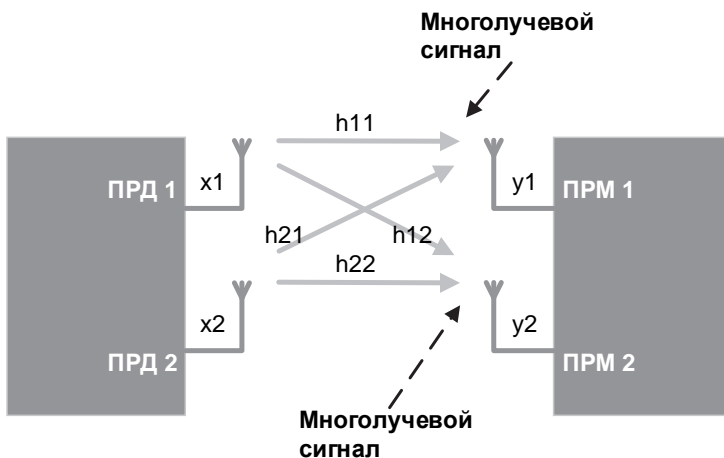
- отсутствие скрытных и помехозащищенных режимов работы;

- использование высоких (выше 2 ГГц) диапазонов рабочих частот, не предназначенных для работы на пересеченной местности, в особенности при небольших высотах подвеса антенн на роботе и пункте дистанционного управления (ПДУ).

4. Перспективные методы построения АПД. Все вышеперечисленное говорит о том, что АПД для РТК ВН должна быть специализированной. Практический опыт разработки и создания АПД для РТК ВН и анализ тенденций развития мировой индустрии в этой области [12] показывает, что при создании АПД для РТК ВН перспективными являются:

1. Метод ортогонального частотного уплотнения (Orthogonal Frequency Division Multiplexing – OFDM) в сочетании со спектрально-эффективными сигнально-кодowymi конструкциями (QAM-16, QAM-64), эффективные алгоритмы помехоустойчивого кодирования (каскадные коды, блочные и сверточные турбокоды с быстрыми алгоритмами декодирования, обеспечивающими минимальные (не более 100 мкс) задержки в канале).

2. Метод разнесенного приема и передачи сигналов (Multiple In Multiple Out – MIMO) для увеличения помехоустойчивости и надежности работы на пересеченной местности [13]. В среде с многолучевым распространением передаваемый сигнал, прежде чем достигнет приемника, рассеивается и отражается от различных объектов, таких как здания, деревья, горы. При наличии как минимум двух приемников с разнесенными антеннами появляется возможность выбора лучших из принятых прямых и переотраженных сигналов, а также их комбинирования по различным алгоритмам, что увеличивает помехоустойчивость канала связи на величину от 3 до 10 дБ. При наличии двух и более передающих антенн эффективность данного метода увеличивается. На рисунке 1 приведена схема работы аппаратуры MIMO 2x2 [13]. При разработке модемов MIMO-OFDM чрезвычайно актуальной является задача оценки параметров многолучевых каналов связи [14].



h_{11} , h_{12} , h_{21} , h_{22} – комплексные коэффициенты передачи лучей
 x_1 , x_2 – передаваемые сигналы
 y_1 , y_2 – принимаемые сигналы

Рис. 1. Иллюстрация работы метода ММО 2x2

3. Многодиапазонные и широкодиапазонные радиочастотные тракты для работы в сложных географических [15] и электромагнитных условиях, а также в условиях действия объектовых средств РЭБ. Широкие диапазоны частот АПД позволяют обеспечить ЭМС в месте применения РТК, а также организовать несколько независимых сетей РТК. Применение аппаратуры в диапазонах частот, требующих прямой видимости (выше 2-3 ГГц), в случаях, где это возможно (связь в колонне, работа на близких дистанциях и на открытой местности), позволяет разгрузить низкие диапазоны частот (до 1 ГГц), традиционно загруженные средствами связи оперативного-тактического звена.

4. Режимы «ретрансляция» и «точка-многоточка» для поддержки задачи группового управления роботами. При работе роботов в группе использование одного из роботов в качестве ретранслятора для другого увеличивает надежность связи, дальность управления и живучесть комплекса. Для реализации режимов «точка-многоточка», как правило, используются методы временного и частотного уплотнения каналов (абонентов), а также комбинации указанных методов. На рисунке 2 приведен пример временного

уплотнения каналов (Time Division Multiple Access – TDMA) в системе с OFDM-модуляцией, предложенный в [16]. В данном решении используется структура информационных фреймов на базе OFDM-сигналов, интегрированная во временные слоты TDMA.

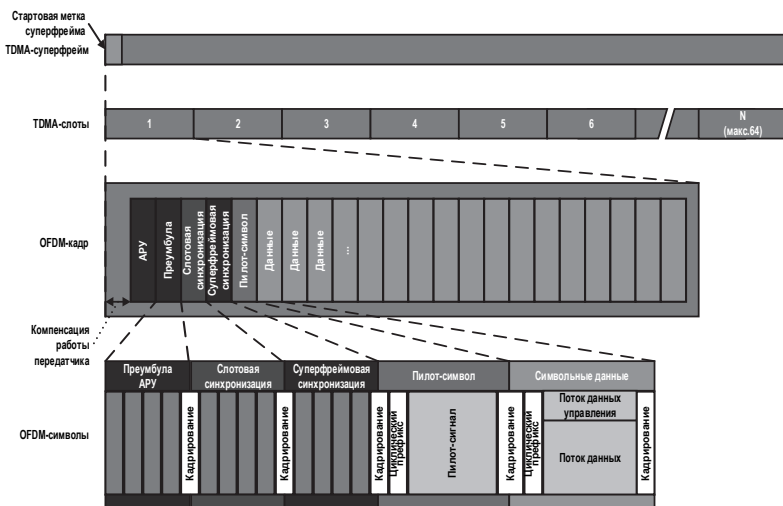


Рис. 2. Пример временного уплотнения каналов (абонентов) системе с OFDM-модуляцией

Основной принцип TDMA заключается в том, что имеющийся ресурс разделяется между участниками информационного обмена на циклически повторяющиеся промежутки времени (TDMA-слоты на рисунке 2).

Метод OFDM в сочетании с TDMA позволяет наиболее эффективно использовать частотно-временной ресурс в задачах управления несколькими роботами из состава РТК ВН.

Следует, однако, учитывать, что при использовании временного уплотнения парциальная пропускная способность канала связи отдельного робота уменьшается пропорционально количеству одновременно активных роботов. В то же время при использовании частотного уплотнения частотный ресурс, занимаемый РТК, увеличивается пропорционально количеству активных роботов. Расширение занимаемого частотного ресурса, в свою очередь, обостряет вопрос электромагнитной совместимости (ЭМС) с другими радиосредствами, работающими в непосредственной близости [17]. Поэтому предпочтительные схемы уплотнения каналов (абонентов)

следует определять для каждого типа РТК в зависимости от количества роботов, активных в единицу времени, а также от специфики применения РТК [18].

5. Интеллектуальные алгоритмы, позволяющие адаптировать канал радиосвязи к изменяющимся условиям эксплуатации (помеховая обстановка, условия распространения). Адаптация подразумевает нахождение компромисса между скоростью передачи информации, спектральной эффективностью, помехоустойчивостью и выходной мощностью. Работа на переднем крае диктует требование высокой скрытности и помехоустойчивости. Наличие радиопередатчика на роботе и ПДУ обуславливает возможность применения противником средств обнаружения и радиоэлектронного противодействия. Это обстоятельство диктует применение в АПД адаптивных режимов работы, среди которых:

— режим адаптивной модуляции, при котором АПД подстраивается к характеристикам канала в каждый момент времени, «перекачивая» скорость передачи в помехоустойчивость и наоборот [18]. В зависимости от отношения сигнал/шум (ОСШ) АПД выбирает метод модуляции, при котором может быть обеспечена устойчивая работа (рисунок 3).

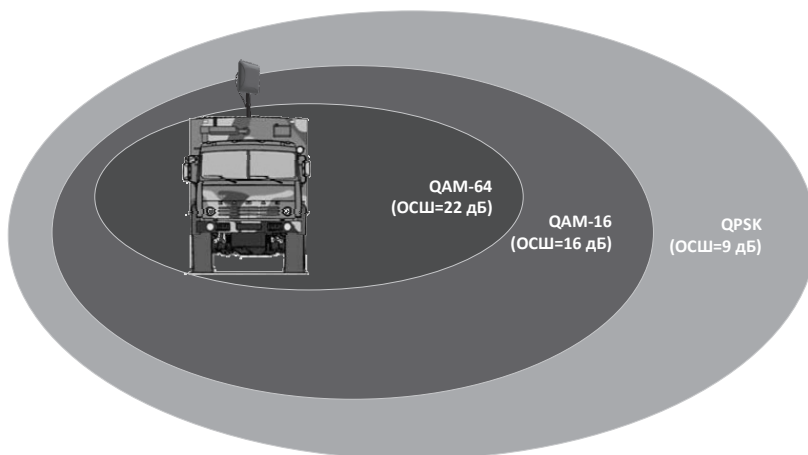


Рис. 3. Предпочтительный метод модуляции в зависимости от отношения сигнал/шум

— режим адаптивной мощности, при котором АПД постоянно регулирует выходную мощность передатчика и излучает тот уровень мощности, который необходим для поддержания заданного качества

связи [19]. Этим улучшается показатель разведзащищенности АПД и РТК в целом, а также обеспечивается объектовая и общая электромагнитная совместимость.

5. Заключение. Существующие технические возможности построения РТК обеспечивают решение задач группового взаимодействия объектов. На любом уровне реализации группового взаимодействия к аппаратуре передачи данных предъявляются повышенные требования.

Реализация рассмотренных методов и алгоритмов в аппаратуре (особенно для группового управления РТК) требует использования последних достижений микроэлектроники, что позволит обеспечить высокую производительность обработки (быстродействие), оптимизировать параметры и повысить степень интеграции аппаратуры.

Современные тенденции развития рынка микроэлектроники и телекоммуникаций диктуют разработку так называемых «систем на кристалле» (System-on-Chip – SoC). Под устройствами класса «система на кристалле» (СнК) в общем случае понимаются устройства, на едином кристалле которых интегрированы один или несколько процессоров, функциональных устройств, некоторый объем памяти, ряд периферийных устройств и интерфейсов, — то есть максимум того, что необходимо для решения поставленных перед аппаратурой задач. Разработка «систем на кристалле» предполагает оптимизацию разрабатываемой схемотехники, что непосредственно сказывается на производительности (быстродействии), потребляемой мощности, площади кристалла, и как следствие, стоимости [20, 21].

Разработка и использование отечественной доверенной СнК, реализующей функции модема АПД, позволит унифицировать модемы для переносной, носимой и возимой АПД, обеспечит высокие эксплуатационные характеристики РТК ВН, а также снизит зависимость от поставок иностранной ЭКБ.

Литература

1. *Комченков В.И., Петров В.Ф., Симонов С.Б., Терентьев А.И.* Методика построения роботизированных безэкипажных объектов наземного базирования // Известия ЮФУ. Технические науки. 2013. № 3. С. 25–30.
2. July Proceedings // Unmanned Ground Systems Roadmap. Robotics Systems Joint Project Office. 2012.
3. *Рубцов И.В.* Вопросы состояния и перспективы развития отечественной наземной робототехники военного и специального назначения // Известия ЮФУ. Технические науки. 2013. № 3(140). С. 14–20.
4. *Корчак В.Ю., Рубцов И.В., Рябов А.В.* Состояние и перспективы развития наземных робототехнических комплексов военного и специального назначения // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. № 3. С. 1–10.

5. *Бархоткин В.А. и др.* Электронный комплекс управления для роботизированной специальной пожарной машины // Известия вузов. ЭЛЕКТРОНИКА. 2015. Том 20. № 5, С. 543–550.
6. *Бархоткин В.А., Петров В.Ф., Терентьев А.И.* Моделирование движения робототехнического комплекса на основе навигационной информации // «Оборонная техника». 2014. № 3–4. С. 64–69.
7. *Павлов Е.В.* Технический состав робототехнического комплекса тяжелого класса многорежимного тушения пожара // Пожарная безопасность. Научно-технический журнал. 2015. № 1. С. 109–110.
8. *Muhl G., Fiege L., Pietzuch P.* Distributed Event-Based Systems // Springer-Verlag GmbH. 2006. 388 p.
9. *Капустян С.Г.* Интеллектуальная система автоматического вождения безэкипажного транспортного средства // Известия ТРТУ. 2002. № 1(24). С. 53–54.
10. *Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г.* Управление коллективом интеллектуальных объектов на основе стайных принципов // Вестник ЮНЦ РАН. 2005. Т. 1, № 2. С. 20–27.
11. *Мешман Л.М. и др.* Состояние и перспективы повышения эффективности водяных и пенных автоматических установок пожаротушения // Пожарная безопасность. Научно-технический журнал. 2015. № 1. С. 103–108.
12. *Сердюк П.Е., Слюсар В.И.* Средства связи с наземными роботизированными системами: современное состояние и перспективы // Электроника: наука, технология, бизнес. 2014. № 7(139). С. 66–79.
13. *Sibille A., Oestges C., Zanella A.* MIMO: From Theory to Implementation // Academic Press. 2010. 384.
14. *Крейнделин В.Б., Колесников А.В.* Оценивание параметров канала в системах связи с ортогональным частотным мультиплексированием. Учебное пособие // М.: МТУСИ. 2010. 29 с.
15. *Архипкин А.В. и др.* Компьютерное моделирование затухания в радиоканале с подвижным пунктом связи на пересеченной местности // Материалы 11-ой международной научно-технической конференции «Перспективные технологии в средствах передачи информации». 2015. С.159–161.
16. *The Unmanned Ground Vehicles (UGV) Market 2010-2020.* URL: <http://www.reportlinker.com/p0254445/The-Unmanned-Ground-Vehicles-UGV-Market-Military-Robots-for-EOD-Counter-IED.html> (дата обращения: 22.02.2016).
17. *Hanzo L., Bhog J., Ni S.* 3G, HSPA and FDD versus TDD Networking: Smart Antennas and Adaptive Modulation // Wiley-IEEE Press. 2 edition. 2008. 596 p.
18. *МСЭ-R SM.337-6,* Частотный и территориальный разнос // Рекомендации международного союза электросвязи.
19. *Kaemarungsi K., Krishnamurthy P.* On the use of adaptive OFDM to preserve energy in ad hoc wireless networks // Proceedings of 13th MPRG/Virginia Tech Symposium on Wireless Personal Communications. 2003.
20. *Greaves D. J.* System on Chip Design and Modelling // University of Cambridge Computer Laboratory Lecture Notes. 2011. 130 p.
21. *Немудров В., Корнеев И.* Микросхемы для телекоммуникационной аппаратуры. Нужны ли отечественные разработки? // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2008. №6. С.26-31.

References

1. *Komchenkov V.I., Petrov V.F., Simonov S.B., Terent'ev A.I.* [A method for constructing robotic unmanned ground-based facilities]. *Izvestija JuFU. Tehnicheskie nauki – Vestnik SFU. Technical science.* 2013. vol. 3. pp. 25–30. (In Russ.).

2. July Proceedings. Unmanned Ground Systems Roadmap. Robotics Systems Joint Project Office. 2012.
3. Rubcov I.V. [Current Situation And Perspective Of Development For Ground Military And Special Robotics]. *Izvestija JuFU. Tehnicheskie nauki – Vestnik SFU. Technical science*. 2013. vol. 3(140). pp. 14–20. (In Russ.).
4. Korchak V.Ju., Rubcov I.V., Rjabov A.V. [State of the art and prospects of development for military and special-purpose ground-based robotic systems]. *Inzhenernyj zhurnal: nauka i innovacii – Engineering Journal: Science and Innovation*. 2013. vol. 3. pp. 1–10. (In Russ.).
5. Barhotkin V.A. et al. [The electronic control system for robotic special fire engine]. *Izvestija vuzov. JeLEKTRONIKA – Bulletin universities. Electronics*. 2015. vol. 20. no .5, pp. 543–550. (In Russ.).
6. Barhotkin V.A., Petrov V.F., Terent'ev A.I. [Simulation of the motion robotic system on the basis of the navigation information]. «*Oboronnaja tehnika*» – "*Defense Technology*". vol. 3–4. 2014. pp. 64–69. (In Russ.).
7. Pavlov E.V. [Technical staff robotic system heavy-class multi-mode fire fighting]. *Pozharnaja bezopasnost'. Nauchno–tehnicheskij zhurnal – Fire safety. Scientific and technical journal*. 2015. vol. 1, pp. 109–110. (In Russ.).
8. Muhl G., Fiege L., Pietzuch P. *Distributed Event-Based Systems*. Springer-Verlag GmbH. 2006. 388 p.
9. Kapustjan S.G. [Intelligent system for automatic driving unmanned vehicle]. *Izvestija TRTU – Vestnik TSRU*. 2002. vol. 1(24). pp. 53–54. (In Russ.).
10. Kaljaev I.A., Gajduk A.R., Kapustjan S.G. [Managing a team of intelligent objects based on old principles]. *Vestnik JuNC RAN – Vestnik SSC RAS*. 2005. vol. 1, no. 2. pp. 20–27. (In Russ.).
11. Meshman L.M. et. al. [Status and prospects for raising the efficiency of water and foam automatic fire extinguishing systems]. *Pozharnaja bezopasnost'. Nauchno-tehnicheskij zhurnal – Fire safety. Scientific and technical journal*. 2015. vol. 1. pp. 103–108. (In Russ.).
12. Serdjuk P.E., Slijusar V.I. [Communication with the ground robotic systems: current status and prospects]. *Jelektronika: nauka, tehnologija, biznes – Electronics: Science, Technology, Business*. 2014. vol. 7(139). pp. 66–79. (In Russ.).
13. Sibille A., Oestges C., Zanella A. *MIMO: From Theory to Implementation*. Academic Press. 2010. 384.
14. Krejndelin V.B., Kolesnikov A.V. *Ocenivanie parametrov kanala v sistemah svjazi s ortogonal'nym chastotnym mul'tipleksirovaniem. Uchebnoe posobie* [Channel estimation in communication systems with orthogonal frequency division multiplexing. Tutorial]. M.: MTUSI. 2010. 29 p. (In Russ.).
15. Arhipkin A.V. et. al. [Computer simulation of attenuation in the radio channel with the mobile point of contact in rough terrain]. *Materialy 11-oj mezhdunarodnoj nauchno–tehnicheskij konferencii «Perspektivnye tehnologii v sredstvach peredachi informacii»* [Proceedings of the 11th International Scientific and Technical Conference "Advanced technologies in communication tools"]. 2015. pp.159–161. (In Russ.).
16. The Unmanned Ground Vehicles (UGV) Market 2010–2020. Available at: www.reportlinker.com/p0254445/The-Unmanned-Ground-Vehicles-UGV-Market-Military-Robots-for-EOD-Counter-IED.html (accessed: 22.02.2016).
17. Hanzo L., Bhog J., Ni S. 3G, HSPA and FDD versus TDD Networking: Smart Antennas and Adaptive Modulation. Wiley–IEEE Press. 2 edition. 2008. 596 p.
18. [MSJe–R SM.337–6, The frequency and territorial separation]. Rekomendacii mezhdunarodnogo sojuza jelektrosvjazi. (In Russ.).

19. Kaemarungsi K., Krishnamurthy P. On the use of adaptive OFDM to preserve energy in ad hoc wireless networks. Proceedings of 13th MPRG.Virginia Tech Symposium on Wireless Personal Communications. 2003.
20. Greaves D. J. System on Chip Design and Modelling. University of Cambridge Computer Laboratory Lecture Notes. 2011. 130 p.
21. Nemudrov V., Korneev I. [Chips for telecommunications equipment. Do we need domestic developments?]. *JeLEKTRONIKA: Nauka, Tehnologija, Biznes – Electronics: Science, Technology, Business*. 2008. no. 6. pp. 26–31. (In Russ.).

Архипкин Андрей Владимирович — к-т техн. наук, ведущий научный сотрудник, Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники» (МИЭТ). Область научных интересов: беспроводные системы связи. Число научных публикаций — 103. Andrey.arkhipkin@gmail.com; пл. Шокина, 1, Москва, Зеленоград, 124498; р.т.: 8(499)7208751.

Arkhipkin Andrey Vladimirovich — Ph.D., leading researcher, National Research University of Electronic Technology (MIET). Research interests: wireless communication systems. The number of publications — 103. Andrey.arkhipkin@gmail.com; 1, Shokina Sq., Moscow, Zelenograd, 124498; office phone: 8(499)7208751.

Комченков Владимир Иванович — ведущий инженер, Управление перспективных межвидовых исследований и специальных проектов (УПМИ и СП). Область научных интересов: вооружение и военная техника, робототехника. Число научных публикаций — 78. aaatt@mail.ru; К-119160, Москва.

Komchenkov Vladimir Ivanovich — leading engineer, Management of perspective interspecific researches and special projects of the Ministry of Defence of the Russian Federation. Research interests: arms and military equipment, robotic technology. The number of publications — 78. aaatt@mail.ru; K-119160, Moscow.

Корольков Дмитрий Николаевич — ведущий инженер-электроник, Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники» (МИЭТ). Область научных интересов: электронные вычислительные устройства. Число научных публикаций — 27. jimmy@olvs.miee.ru; пл. Шокина, 1, Москва, Зеленоград, 124498; р.т.: 8(499)7208751.

Korolkov Dmitry Nikolaevich — leading electronics engineer, National Research University of Electronic Technology (MIET). Research interests: electronic computing devices. The number of publications — 27. jimmy@olvs.miee.ru; 1, Shokina Sq., Moscow, Zelenograd, 124498; office phone: 8(499)7208751.

Петров Владимир Федорович — к-т техн. наук, заместитель директора, Научно – исследовательский институт вычислительных средств и систем управления (НИИ ВС и СУ МИЭТ). Область научных интересов: вооружение и военная техника, системы управления, робототехнические комплексы. Число научных публикаций — 94. pvf@olvs.miee.ru; пл. Шокина, 1, Москва, Зеленоград, 124498; р.т.: 8(499)7208751.

Petrov Vladimir Fedorovich — Ph.D., deputy director of computing and control systems research institute, National Research University of Electronic Technology (MIET). Research interests: arms and military equipment, management systems, robotic complexes. The number of publications — 94. pvf@olvs.miee.ru; 1, Shokina Sq., Moscow, Zelenograd, 124498; office phone: 8(499)7208751.

Симонов Сергей Борисович — к-т техн. наук, ведущий инженер-программист, Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники» (МИЭТ). Область научных интересов: операционные системы, вычислительные сети, программирование. Число научных публикаций — 34. sb.simonov@gmail.com; пл. Шокина, 1, Москва, Зеленоград, 124498; p.t.: 8(499)7208751.

Simonov Sergei Borisovich — Ph.D., leading software engineer, National Research University of Electronic Technology (MIET). Research interests: operating systems, computer networks, programming. The number of publications — 34. sb.simonov@gmail.com; 1, Shokina Sq., Moscow, Zelenograd, 124498; office phone: 8(499)7208751.

Терентьев Алексей Игоревич — к-т техн. наук, старший научный сотрудник, Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники» (МИЭТ). Область научных интересов: моделирование, информационно-управляющие системы, нечеткая логика, элементы искусственного интеллекта, системы промышленной автоматки. Число научных публикаций — 45. terentev@olvs.micee.ru; пл. Шокина, 1, Москва, Зеленоград, 124498; p.t.: 8(499)7208751.

Terentev Alexey Igorevich — Ph.D., senior researcher, National Research University of Electronic Technology (MIET). Research interests: simulation, management information systems, fuzzy logic, elements of artificial intelligence. The number of publications — 45. terentev@olvs.micee.ru; 1, Shokina Sq., Moscow, Zelenograd, 124498; office phone: 8(499)7208751.

Поддержка исследований. Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России, проект №2933

Acknowledgements. This research is supported by Ministry of Education and Science of Russia, grant 2933.

РЕФЕРАТ

Петров В.Ф., Терентьев А.И., Симонов С.Б., Корольков Д.Н., Комченков В.И., Архипкин А.В. **Задачи группового управления роботами в робототехническом комплексе пожаротушения.**

Одним из путей создания робототехнических комплексов (РТК) специального назначения является модернизация существующих экипажных образцов военной техники. Взаимодействие между роботами в группе может быть представлено в виде ранжированного ряда с возрастанием сложности задачи. По мере возрастания возможностей автономного функционирования роботов объем передаваемой видеoinформации между роботами и пунктом управления сокращается.

Для решения задач группового управления РТК на различных уровнях необходима разработка аппаратуры передачи данных, к которой предъявляются повышенные требования. Рассмотрены проблемы выбора методов и алгоритмов реализации помехоустойчивых каналов связи для робототехнических комплексов специального и военного назначения тяжелого класса. Обосновано, что аппаратура передачи данных для робототехнических комплексов должна быть специализированной, строиться на основе эффективных сигнально-кодовых конструкций, использовать различные методы адаптации канала радиосвязи к изменяющимся условиям эксплуатации (помеховая обстановка, условия распространения). Рассмотрены особенности и варианты построения аппаратуры передачи данных для группового управления роботами, показаны преимущества и недостатки схем временного и частотного уплотнения каналов (абонентов).

SUMMARY

Petrov V.F., Terentev A.I., Simonov S.B., Korolkov D.N., Komchenkov V.I., Arkhipkin A.V. **Problems of Group Control of Robots in the Robotic Complex of Fire Extinguishing.**

One of ways of creation of robotic complexes (RTK) of a special purpose is upgrade of the existing vehicular samples of military equipment. Interaction between robots in group can be presented in the form of the ranged row with increase of complexity of the task. In process of increase of opportunities of independent functioning of robots the volume of the transferred video information between robots and control center is reduced.

Development of the data-communication equipment with high demands imposed is necessary for solving the problems of unmanned robots group control on various levels. In this paper methods and algorithms for noise-immunity communication channel implementation are described. Substantiated that communication equipments for these channels have to be special-purpose and they have to use effective signal-code constructions which can adopt to changing environments. Features and options for multiple unmanned ground vehicles (UGV) control communications are described, advantages and disadvantages of time division multiple access and frequency division multiple access are considered.

А.В. Клоков, В.П. ЯКУБОВ, С.Э. ШИПИЛОВ, В.И. ЮРЧЕНКО
**РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ
РОБОТОВ НА ОСНОВЕ РАДИОВИДЕНИЯ С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФОКУСИРУЮЩИХ ЛИНЗ ЛЮНЕБЕРГА**

Клоков А.В., Якубов В.П., Шипилов С.Э., Юрченко В.И. Разработка системы технического зрения для роботов на основе радиовидения с использованием фокусирующих линз люнеберга.

Аннотация. В докладе представлена разработка методики проектирования однопозиционных модулей активного радиовидения для систем радиолокационного контроля различных объектов и обеспечения систем технического зрения в условиях плохой видимости, которая также может быть использована для визуализации скрытых под одеждой человека опасных предметов в условиях интенсивного пассажиропотока. В основу заложена технология управляемой фокусировки излучения с использованием интеграции линзы Люнеберга и автодиновых датчиков.

Ключевые слова: техническое зрение, радиовидение, линза Люнеберга, автодин, фокусировка излучения, синтезирование апертуры.

Klokov A.V., Yakubov V.P., Shipilov S.E., Yurchenko V.I. Development of the Vision Systems Based on Radiowave Using a Luneburg Lens Focusing for Robots.

Abstract. The report presents the development of the design methodology of active radio-wave single-position modules for radar control systems of various facilities and the provision of technical vision systems in low visibility conditions, which can also be used for visualizing dangerous objects hidden beneath a person's clothing in heavy passenger traffic. It is based on the focusing technologies of radiowave radiation with the Luneberg lens and the autodyne sensors.

Keywords: vision systems; radiovision; Luneburg lens; autodyne; radiowave focusing; synthetic aperture.

1. Введение. Под активной системой радиовидения понимается радиолокационная система микроволнового диапазона, используемая для выборочного секторного или полного обзора окружающего пространства с целью визуализации скрытых в ручной клади, под одеждой человека или в багаже предметов, представляющих потенциальную опасность. В сравнении с оптическими системами, системы радиовидения дают возможность получать изображения объектов практически независимо от метеоусловий и естественной освещенности, на значительно удаленном и одновременно в широкой зоне обзора, в том числе объектов, невидимых в оптическом диапазоне волн [1-6]. Активность системы призвана обеспечить существенно более высокий уровень отношения сигнал-шум по отношению к пассивным системам, использующим контраст собственного радиотеплового излучения человека и скрытых предметов. При этом уровень излучения, приходящегося на человека, ниже предельно допустимых норм и находится на уровне меньшем, чем для излучения работающих сотовых телефонов [7-16].

Использование линз Люнеберга позволяет существенно упростить аппаратную фокусировку излучения в широком диапазоне углов. Требуемая разрешающая способность имеет порядок 1 см, что обеспе-

чивается сочетанием двух дополняющих друг друга подходов — механического углового сканирования и синтезирования большой апертуры. Комплексование подходов реализуется на основе алгоритмов томосинтеза, которые специально разрабатываются для данного комплекса [9, 12, 14, 15].

Актуальным является использование предлагаемой системы радиовидения для обеспечения подвижных роботов в условиях недостаточной видимости. Система найдет применение для обеспечения управлением транспортными средствами в условиях плохой видимости, например, в тумане или в дымовых завесах, а также при обеспечении управления и развязки интенсивных транспортных потоков [17-23].

2. Состав модуля радиовидения. Для достижения заданных параметров электронного модуля пассивного радиовидения (ЭМПР) используется оригинальная технология, основанная на многоракурсной одновременной фокусировке сигналов двумя цилиндрическими линзами: диэлектрической линзой и линзой Люнеберга. При этом раздельно, но одновременно на аппаратном уровне идет фокусировка во взаимно ортогональных плоскостях — вертикальной и горизонтальной. Это существенно усиливает регистрируемые сигналы и снижает технические требования на чувствительность датчиков для их регистрации в каждом из каналов, причем одновременно, независимо и при полном круговом обзоре. Немаловажным для надежности обстоятельством является простота и технологичность конструкции. Основные требования к параметрам опытных образцов электронного модуля пассивного радиовидения приведены в таблице №1.

Таблица 1. Требования к параметрам ЭМПР

№	Наименование параметра	Значение
1	Рабочая частота в середине полосы приема, ГГц.	35
2	Расстояние до границ охраняемого объекта, м.	10-500
3	Угловая зона обзора, град.	до 360
4	Скорость сканирования, кадров/с.	5-10
5	Количество каналов в приемной матрице, шт.	48
6	Диаметр апертуры приемной антенны, м.	1,0
7	Минимальный различаемый контраст радиоизображений, °К.	0,5
8	Пространственное разрешение (в режиме сверхразрешения), м.	1,5 (0,5)

В состав унифицированного ЭМПР должны входить:

- ◆ антенный элемент с линзой Люнеберга;
- ◆ коммутатор;
- ◆ эквивалент нагрузки;
- ◆ входной усилитель;
- ◆ детектор;
- ◆ регулируемый аттенюатор;
- ◆ видеоусилитель;
- ◆ термостабилизатор.

3. Линза Люнеберга. В основе разрабатываемой конструкции ЭМНР лежит идея использования плоской линзы Люнеберга волноводного типа (рисунок 1). На этом рисунке приведен действующий вариант такой линзы диаметром 16 см для рабочей частоты 35 ГГц. Достижимый реально при этом коэффициент усиления линзы равен 20 дБ. При увеличении ее диаметра до 1 м коэффициент усиления поднимется 28 дБ.

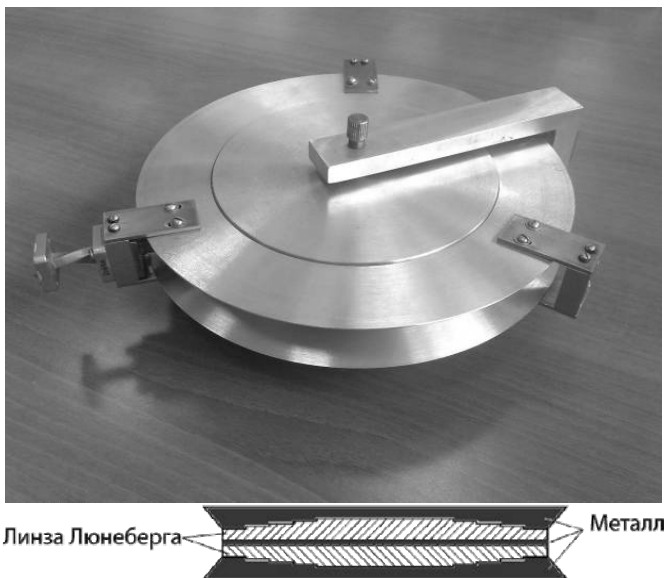


Рис. 1. Двухслойная линза Люнеберга

Отличительной особенностью такой линзы Люнеберга является возможность высокой локализации излучения в горизонтальной плоскости с шириной диаграммы направленности (ДН) порядка $1,3^\circ$ и относительно широкой ДН в вертикальной плоскости 30° (рисунок 2).

Предлагаемая на рисунке 1 конструкция линзы Люнеберга двухслойная. Для исключения взаимного и затеняющего влияния облучатели размещаются по периметру линзы в секторе 90° по 12 штук на расстоянии 6,5 см друг от друга. Четырехсекторная структура из двух линз Люнеберга, расположенных друг над другом, позволяет задействовать 48 независимых датчиков излучения и перекрывать сектор обзора 360° в азимутальной плоскости. Все датчики опрашиваются параллельно, т.е. одновременно. Получающиеся лучи разделены по азимуту между собой зазорами — «мертвыми зонами» шириной порядка 5° . Эти зазоры можно устранить, например, путем использования «этажерки» из пяти параллельных линз, повернутых на 1° каждая

следующая относительно предыдущей. Тот же самый эффект можно достигнуть простым вращением изначальной пары двухслойных линз вокруг вертикальной оси. Для обеспечения скорости сканирования 5-10 кадров/с достаточным является вращение со скоростью 5-10 об/мин. Это минимально достаточная скорость. При большей скорости вращения достигается большая скорость кадровой развертки.

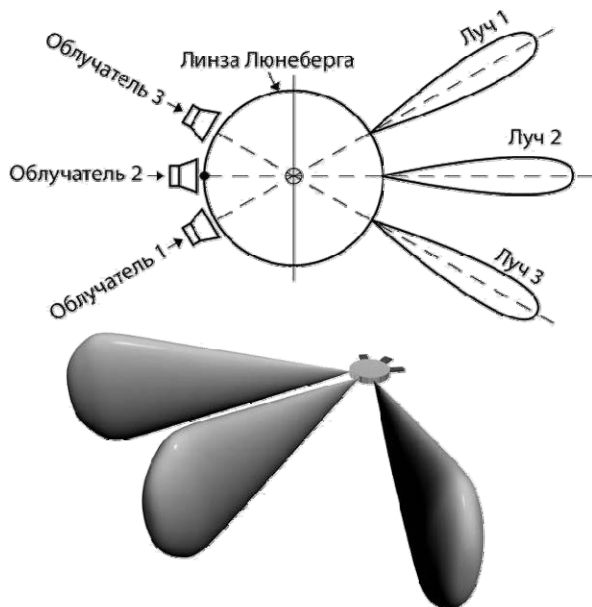


Рис. 2. Диаграммные свойства линзы Люнеберга

Необходимая чувствительность (0,5 °К) достигается с использованием гетеродинного приемника на основе балансного смесителя. Усиленный сигнал промежуточной частоты поступает на видеодетектор и далее через АЦП передается на вход ПЭВМ, где обрабатывается. Полоса пропускания 1 ГГц (3 % от несущей частоты) при времени накопления 0,1 с обеспечивает в двухполосном режиме радиометрическое усиление порядка 43 дБ. При коэффициенте шума смесителя вместе с УПЧ до 10 дБ ($T_{ш} = 3000$ °К) ожидаемая радиометрическая чувствительность составит 0,15 °К, что вполне достаточно для реального обеспечения необходимой чувствительности. Поскольку круговой обзор осуществляется достаточно быстро (до 10 кадров в секунду), и важна лишь относительная контрастность деталей изображения, а не их абсолютное значение, то особой термостабилизации не требуется [24-26].

Обеспечиваемое линзой Льюнеберга диаметром 1 м угловое разрешение составляет $1,3^\circ$ в азимутальной плоскости. Этому соответствует пространственное разрешение 1,5 м на расстоянии 70 м от охраняемого объекта. Такая величина определяется по результатам измерений с реальной линзой Льюнеберга. Если оценку углового разрешения сделать по дифракционному пределу для выбранной частоты излучения 35 ГГц, то получается величина $0,5^\circ$. Пространственное разрешение порядка 1,5 м тогда достигается на расстоянии 175 м от охраняемого объекта. Для обеспечения лучшего пространственного разрешения применим метод сверхразрешения, основанный на применении винеровской фильтрации с использованием функции размытия точки и регуляризации. При этом в зависимости от уровня мешающих шумов пространственное разрешение может быть реально увеличено в 3-10 раз.

4. Цилиндрическая линза. Для получения развертки в вертикальном направлении может быть использована цилиндрическая диэлектрическая линза (рисунок 3), внутри которой размещается рассмотренная ранее вращающаяся «этажерка» из линз Льюнеберга. Фокальная поверхность цилиндрической линзы совмещается с боковой цилиндрической поверхностью «этажерки» из линз Льюнеберга. Каждая линза Льюнеберга отвечает за горизонтальную развертку в заданной строке. Номер строки определяется вертикальным сдвигом положения линзы Льюнеберга на фокальной поверхности цилиндрической диэлектрической линзы. В качестве материала для изготовления цилиндрической линзы может быть использован, например, полиэтилен высокого давления или искусственный диэлектрик.

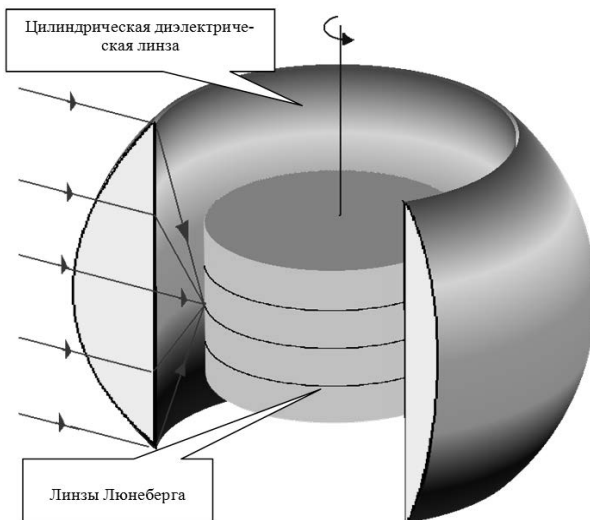


Рис. 3. Цилиндрическая диэлектрическая линза для вертикальной развертки

Назначение предлагаемой системы — контроль подступов и самой территории промышленных объектов, а также обеспечения управления транспортными средствами в условиях плохой видимости. Такие системы призваны обеспечить радиовидение всех объектов, отличающихся по форме и ориентации в пространстве. Изготовленная радиоволновая система может работать в пассивном режиме. Информационным параметром при этом будет выступать радиояркостная температура объектов обзора. В условиях плотного потока транспортных средств системы пассивного обзора окружающего пространства, установленные на самих транспортных средствах, способны стать техническим способом предотвращения столкновений и аварийных ситуаций в условиях сильных туманов, дымок и дымовых завес при ограниченной видимости или при полном ее отсутствии в оптическом диапазоне, например, зимой или в периоды стихийных бедствий.

5. Заключение. Использование линзы Люнеберга в конструкции существенно улучшает аэродинамические характеристики радиоволновых систем технического зрения, и это допускает ее применение и на аэрокосмических носителях. К тому же повышается радиоволновая скрытность изделия. При установке предлагаемой системы на крыше транспортного средства металлический корпус крыши практически не влияет на его работоспособность. Важно, что линзы изготавливаются из легких материалов, например, вспененного полистирола, что допускает существенное уменьшение массы.

ЭМНР способны стать частью полного томографического обзора окружающего пространства для всепогодных систем безопасности и автоматического наведения электронных средств защиты гражданских и военных объектов, например, танков в период боевых действий. Важнейшим достоинством предлагаемой системы является его универсальность, 100% безвредность для человека и скрытность для средств радиоразведки.

Подводя итог, можно сказать, что разрабатываемая система технического зрения с линзой Люнеберга сможет внедриться в различные области и отрасли гражданского и военного применения, а также стать самостоятельным инновационным товаром. Переход на ультразвуковое излучение позволит использовать этот подход для построения систем подводного звуковидения.

Литература

1. *Berthold K.P. Horn. Robot Vision // MIT Press. 1986. 480 p.*
2. *Batchelor B.G., Whelan P.F. Intelligent Vision Systems for Industry // Springer-Verlag. 1997. 456 p.*
3. *Demant C., Streicher-Abel B., Waszkewitz P. Industrial Image Processing: Visual Quality Control in Manufacturing // Springer-Verlag. 1999. 369 p.*

4. *Gonzales R.C. and Wintz P.A.* Digital Image Processing // Longman Higher Education. 2001. 976 p.
5. *Pham D.T. and Alcock R.J.* Smart Inspection Systems: Techniques and Applications of Intelligent Vision // Academic Press. 2003. 221 p.
6. *Davies E.R.* Machine Vision: Theory, Algorithms, Practicalities. 3rd edition // Morgan Kaufmann. 2004. 800 p.
7. *Якубов В.П., Шитлов С.Э., Суханов Д.Я., Клоков А.В.* Радиоволновая томография: достижения и перспективы // Томск: НТЛ. 2014. 264 с.
8. *Антипов В.Б., Манаков А.М., Суханов Д.Я., Цыганок Ю.И., Якубов В.П.* Исследование широкополосных приемо-передающих модулей для синтеза радиоизображений // Известия вузов. Физика. 2010. Т.53. № 9/2. С.145–146.
9. *Разинкевич А.К., Якубов В.П., Шитлов С.Э., Пинчук Р.В.* Радиотомография удаленных объектов Радиотомография удаленных объектов // IV Всероссийская конференция «Радиокоммуникация и радиосвязь». 2010. С. 139–142.
10. *Сатаров Р.Н. и др.* Коммутируемая сверхширокополосная антенная решетка для радиотомографии // Известия высших учебных заведений. Физика. 2012. Т.55. № 8. С. 26–30.
11. *Суханов Д.Я., Якубов В.П., Рубаненко А.С.* Двумерное радиовидение с использованием доплеровского радиолокатора и линейного переизлучателя // Известия высших учебных заведений. Физика. 2010. Т. 53. № 9/2. С. 94–95.
12. *Федянин И.С. и др.* Система радиовидения на основе решетки микроволновых датчиков // Контроль. Диагностика. 2012. № 13. С. 141–145.
13. *Федянин И.С., Кузьменко И.Ю., Шитлов С.Э., Якубов В.П.* Радиовидение с использованием микроволновых доплеровских датчиков // Известия высших учебных заведений. Физика. 2012. Т. 55. № 9. С. 220–221.
14. *Якубов В.П., Шитлов С.Э., Сатаров Р.Н.* Сверхширокополосное зондирование за диэлектрическими преградами // Известия высших учебных заведений. Физика. 2010. Т. 53. № 9. С. 10–16.
15. *Якубов В.П., Шитлов С.Э., Сатаров Р.Н.* Сверхширокополосная томография движущихся объектов за диэлектрическими преградами // Контроль. Диагностика. 2011. Спецвыпуск. С. 89–91.
16. *Якубов В.П., Шитлов С.Э., Суханов Д.Я., Разинкевич А.К.* Сверхширокополосная томография удаленных объектов // Дефектоскопия. 2012. № 3. С. 59–65.
17. *Якубов В.П., Шитлов С.Э., Суханов Д.Я.* Микроволновая томография радионепрозрачных объектов // Дефектоскопия. 2011. № 11. С. 62–68.
18. *Яковлев О.И., Якубов В.П., Урядов В.П., Павельев А.Г.* Распространение радиоволн // М.: ЛЕНАНД. 2009. 496 с.
19. *Якубов В.П., Беличенко В.П., Фисанов В.В.* Основы электродинамики излучения и его взаимодействие с веществом. Томск: НТЛ. 2010. 296 с.
20. *Суханов Д.Я., Якубов В.П.* Применение сигналов с линейной частотной модуляцией в трехмерной радиотомографии // Журнал технической физики. 2010. Т. 80. № 4. С. 115–119.
21. *Пинчук Р. и др.* Пространственно-частотное синтезирование в микроволновой томографии // Известия высших учебных заведений. Физика. 2010. Т. 53. № 9/2. С. 108–109.
22. *Федянин И.С., Якубов В.П., Шитлов С.Э., Клоков А.В.* Радиотомография по неполным данным // Контроль. Диагностика. 2011. № 11. С. 51–54.
23. *Якубов В.П., Шитлов С.Э., Суханов Д.Я.* Радио и ультразвуковая томография скрытых объектов // Известия высших учебных заведений. Физика. 2012. Т. 55. № 8. С. 20–25.
24. *Федянин И.С., Кузьменко И.Ю., Шитлов С.Э., Якубов В.П.* Радиовидение с использованием решетки микроволновых доплеровских датчиков // Известия высших учебных заведений. Физика. 2012. Т. 55. № 9/2. С. 270–271.

25. Юрченко В.И., Шаповал Л.Г., Юрченко Н.М. Диоды Ганна из прошлого в будущее // Электронная промышленность. 2014. № 1. С. 23–28.
26. Юрченко В.И. Развитие датчиков СВЧ диапазона // Современная электроника. 2010. № 5. С. 34–35.

References

1. Berthold K.P. Horn. Robot Vision. MIT Press. 1986. 480 p.
2. Batchelor B.G. and Whelan P.F. Intelligent Vision Systems for Industry. Springer-Verlag. 1997. 456 p.
3. Demant C., Streicher-Abel B., Waszkewitzp. Industrial Image Processing: Visual Quality Control in Manufacturing. Springer-Verlag. 1999. 369 p.
4. Gonzales R.C., Wintzp. A. Digital Image Processing. Longman Higher Education. 2001. 976 p.
5. Pham D.T. and Alcock R.J. Smart Inspection Systems: Techniques and Applications of Intelligent Vision. Academic Press. 2003. 221 p.
6. Davies E.R. Machine Vision: Theory, Algorithms, Practicalities. Morgan Kaufmann. 3rd edition. 2004. 800 p.
7. Yakubov V.P., Shipilov S.E., Sukhanov D.Ya., Klovov A.V. *Radiovolnovaya tomografiya: dostizheniya i perspektivy* [Radio-wave tomography: achievements and prospects]. Tomsk: NTL. 2014. 280 p. (In Russ.).
8. Antipov V.B., Manakov A.M., Sukhanov D.Ya., Tsyganok Yu.I., Yakubov V.P. [Study broadband transceiver modules for the synthesis of radio images] *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Fizika – Russian Physics Journal*. 2010. vol. 53. no. 9/2. pp. 145–146. (In Russ.).
9. Razinkevich A.K., Yakubov V.P., Shipilov S.E., Pinchuk R.V. [Tomography of distant objects]. *IV Vserossiiskaja konferentsija "Radiolokatsiya i radiosvyaz"* [Proceedings of the IV Russian Conference "Radiolocation and radio communications"]. 2010. pp. 39–142. (In Russ.).
10. Satarov R.N. et al. [Switched ultrawideband antenna array for radio tomography] *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Fizika. – Russian Physics Journal*. 2012. vol. 55. no. 8. pp. 26–30. (In Russ.).
11. Sukhanov D.Ya., Yakubov V.P., Rubanenko A.S. [The two-dimensional radio-wave imaging using doppler radar and linear re-radiator] *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Fizika – Russian Physics Journal*. 2010. vol. 53. no. 9/2. pp. 94–95. (In Russ.).
12. Fedyanin I.S. et al. [The system of radio vision with using doppler sensors]. *Kontrol'. Diagnostika. – Testing. Diagnostics*. 2012. no. 13. pp. 141–145. (In Russ.).
13. Fedyanin I.S., Kuz'menko I.Yu., Shipilov S.E., Yakubov V.P. [Radiovision by using doppler microwave sensors]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Fizika – Russian Physics Journal*. 2012. vol. 55. no. 9. pp. 220–221. (In Russ.).
14. Yakubov V.P., Shipilov S.E., Satarov R.N. [Ultra-wideband sensing behind of dielectric barriers] *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Fizika – Russian Physics Journal*. 2010. Vol. 53. no. 9. pp. 10–16. (In Russ.).
15. Yakubov V.P., Shipilov S.E., Satarov R.N. [Ultra-wideband tomography of moving beyond the barrier objects]. *Kontrol'. Diagnostika – Testing. Diagnostics*. 2011. no. Sp. pp. 89–91. (In Russ.).
16. Yakubov V.P., Shipilov S.E., Sukhanov D.Ya., Razinkevich A.K. [Ultrabroad-band tomography of remote objects]. *Defektoskopiya – Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2012. no. 3. pp. 59–65. (In Russ.).
17. Yakubov V.P. Shipilov S.E., Sukhanov D.Ya. [Microwave tomography of radiopaque objects]. *Defektoskopiya – Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2011. no. 11. pp. 62–68. (In Russ.).
18. Yakovlev O.I., Yakubov V.P., Uryadov V.P., Pavel'ev A.G. *Rasprostranenie radiovoln* [Radiowave propagation]. Moscow: LENAND. 2009. 496 p. (In Russ.).

19. Yakubov V.P., Belichenko V.P., Fisanov V.V. *Osnovy elektrodinamiki izlucheniya i ego vzaimodeystviye s veshchestvom* [Fundamentals of radiation electro-dynamics and its interaction with matter]. Tomsk. 2010. 296 p. (In Russ.).
20. Sukhanov D.Ya., Yakubov V.P. [Application of linear frequency modulated signals in three-dimensional radio tomography]. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki – Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics*. 2010. vol. 80. no. 4. pp. 115–119. (In Russ.).
21. Pinchuk R. et. al. [Spatial-frequency synthesizer in microwave tomography]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Fizika – Russian Physics Journal*. 2010. vol. 53. no. 9/2. pp. 108–109. (In Russ.).
22. Fedyanin I.S., Yakubov V.P., Shipilov S.E., Klokov A.V. [Incomplete Data Tomography]. *Kontrol'. Diagnostika – Testing, Diagnostics*. 2011. no. 11. pp. 51–54. (In Russ.).
23. Yakubov V.P., Shipilov S.E., Sukhanov D.Ya. [Radio and ultrasonic tomography of hidden objects]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Fizika – Russian Physics Journal*. 2012. vol. 55. No 8. pp. 20–25. (In Russ.).
24. Fedyanin I.S., Kuz'menko I.Yu., Shipilov S.E., Yakubov V.P. [Radiovision using an array of microwave doppler sensor]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Fizika – Russian Physics Journal*. 2012. vol. 55. no. 9/2. pp. 270–271. (In Russ.).
25. Yurchenko V.I., Shapoval L.G., Yurchenko N.M. [Gunn diodes - from the past to the future]. *Elektronnaya promyshlennost' – Electronic industry*. 2014. no. 1. pp. 23–28. (In Russ.).
26. Yurchenko V.I. [The development of microwave sensors]. *Sovremennaya elektronika. – Modern electronics*. 2010. no. 5. pp. 34–35. (In Russ.).

Клоков Андрей Владимирович — к-т техн. наук, доцент кафедры радиофизики, Национальный исследовательский Томский государственный университет (ТГУ). Область научных интересов: радиолокация, геолокация, обработка радиолокационных изображений. Число научных публикаций — 30. 701-kav@mail.tsu.ru; пр. Ленина, 36, Томск, 634050; р.т.: +7(3822)413-675.

Klokov Andrey Vladimirovich — Ph.D., associate professor of radiophysics department, National Research Tomsk State University (TSU). Research interests: radiolocation, geolocation, image processing. The number of publications — 30. 701-kav@mail.tsu.ru; 36, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia; office phone: +7(3822)413-675.

Юрченко Василий Иванович — начальник отдела, АО "Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов" (АО «НИИПП»). Область научных интересов: физика органических и неорганических полупроводников и полупроводниковых приборов, мощные диоды Ганна, датчики магнитных полей на полимерах. Число научных публикаций — 120. yurchenko_vi@niipp.ru, <https://mail.niipp.ru>; ул. Красноармейская, 99а, Томск, 634034; р.т.: 89050892821, Факс: 8(3822)288221.

Yurchenko Vasilii Ivanovich — head of the department, JSC «Research Institute of Semiconductor Devices» (“NIIPP”). Research interests: physics of organic and inorganic semiconductors and semiconductor devices, powerful Gunn diodes, sensors of magnetic fields on polymers. The number of publications — 120. yurchenko_vi@niipp.ru, <https://mail.niipp.ru>; 99a, Krasnoarmeiskaya street, Tomsk, 634034, Russia; office phone: 89050892821, Fax: 8(3822)288221.

Шипилов Сергей Эдуардович — доцент кафедры радиофизики, Национальный исследовательский Томский государственный университет (ТГУ). Область научных интересов: разработка методов радиоволновой томографии на основе сверхширокополосного зондирования, разработка систем фокусировки излучения с использованием антенных

решеток. Число научных публикаций — 56. s.shipilov@gmail.com; пр. Ленина, 36, Томск, 634050; р.т.: +7(3822)413-675.

Shipilov Sergey Eduardovich — Ph.D., associate professor of radiophysics department, National Research Tomsk State University (TSU). Research interests: development of methods of radiowave tomography based on ultra-wideband sensing, development of radiation focusing systems using antenna arrays. The number of publications — 56. s.shipilov@gmail.com; 36, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia; office phone: +7(3822)413-675.

Якубов Владимир Петрович — д-р физ.-мат. наук, академик Российской академии естественных наук, заведующий кафедрой радиофизики, Национальный исследовательский Томский государственный университет (ТГУ). Область научных интересов: статистическая радиофизика, обратные задачи, электродинамика, томография. Число научных публикаций — 130. yvlp@mail.tsu.ru; пр. Ленина, 36, Томск, 634050; р.т.: +7(3822)413-675, Факс: +7 3822412583.

Yakubov Vladimir Petrovich — Ph.D., Dr. Sci., professor, academician of the Russian academy of natural sciences, head of radiophysics department of radiophysics faculty, National Research Tomsk State University. Research interests: statistical physics, electrodynamics, inverse problems. The number of publications — 130. yvlp@mail.tsu.ru; 36, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia; office phone: +7(3822)413-675, Fax: +7 3822412583.

Поддержка исследований. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант р-а № 16-48-700879).

Acknowledgements. This research is supported by RFBR (grant r-a 16-48-700879).

РЕФЕРАТ

Клоков А.В., Якубов В.П., Шипилов С.Э., Юрченко В.И. **Разработка системы технического зрения для роботов на основе радиовидения с использованием фокусирующих линз люнеберга.**

Рассматривается возможность развития систем технического зрения на основе использования однопозиционных модулей активного радиовидения, включающих в себя приемо-передающие СВЧ модули автодиного типа и набор плоских двухслойных линз Люнеберга волноводного типа. Использование «этажерки» из этих линз обеспечивает управляемый практически полный обзор окружающего пространства. Каждая линза имеет диаметр 16 см и на для рабочей частоте 35 ГГц создает фокусировку излучения в горизонтальной плоскости в секторе $1,3^\circ$, а использование многослойной «этажерки» из вращающихся линз Люнеберга с закрепленными на них датчиками позволяет перекрыть сектор обзора 360° в азимутальной плоскости. В вертикальной плоскости сканирование может обеспечить либо использование специальной конструкции цилиндрической линзы, либо использование технологии апертурного синтеза. Проведенные оценки показывают возможность достижения обзора пространства с частотой смены кадров 5-10 Гц. Предлагаемая система призвана обеспечить управление подвижного робота в условиях плохой видимости на суше и на море, но может быть использована и под водой с переходом на ультразвуковое излучение.

SUMMARY

Klokov A.V., Yakubov V.P., Shipilov S.E., Yurchenko V.I. **Development of the Vision Systems Based on Radiowave Using a Luneburg Lens Focusing for Robots.**

The possibility of the development of vision systems based on the use of single-position of active radio vision modules, including UHF transiving modules autodyne type and a set of two-layer planar waveguide Luneburg lens. Using the "stack" of the lens provides a controlled overview of the surrounding area. Each lens has a diameter of 16 cm and an operating frequency of 35 GHz focusing in the horizontal plane in the sector $1,3^\circ$, and the use of multi-layer "stack" of rotating Luneberg lenses with sensors attached to them allows viewing 360° sector in the azimuth plane. The vertical scanning can provided a special use of the cylindrical lens structure, or using aperture synthesis technology. The estimates indicate the possibility of achieving the view space with frame rates of 5-10 Hz. The proposed system is designed to provide a mobile robot control in poor visibility conditions on land and at sea, but can also be used under water with ultrasonic radiation.

А.В. ВАСИЛЬЕВ, А.С. КОНДРАТЬЕВ, А.А. ГРАДОВЦЕВ, И.Ю. ДАЛЯЕВ
**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ПРОЕКТНОГО ОБЛИКА
МОБИЛЬНОЙ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ
ПРОВЕДЕНИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ РАЗВЕДКИ НА
ПОВЕРХНОСТИ ЛУНЫ**

Васильев А.В., Кондратьев А.С., Градовцев А.А., Дальяев И.Ю. **Исследование и разработка проектного облика мобильной робототехнической системы для проведения геологической разведки на поверхности луны.**

Аннотация. Объектом исследования является мобильная робототехническая система (МРТС) для проведения геологической разведки на поверхности Луны. Цель работы — определение технического облика и тактико-технических характеристик МРТС, оснащенной каротажно-буровой установкой, исследование сценариев применения МРТС в ходе проведения геологической разведки на поверхности Луны. Результаты исследования могут быть полезны в ходе дальнейших работ по разработке МРТС для проведения геологической разведки на поверхности Луны, а также при проведении работ по другим видам напланетных робототехнических и транспортных средств, предназначенных для работы на поверхности Луны и Марса.

Ключевые слова: Мобильная робототехническая система, геологическая разведка на поверхности Луны, исследовательский луноход, робот-геолог, каротажно-буровая установка, манипуляционная система, отбор проб грунта, научные исследования на поверхности Луны.

Vasiliev A.V., Kondratyev A.S., Gradovtsev A.A., Dalyaev I.Yu. **Research and Development of Design Shape of a Mobile Robotic System for Geological Exploration on the Moon's Surface.**

Abstract. The object of research is a mobile robot system (MRTS) for geological exploration on the lunar surface. The aim of the project is to define a technical appearance and performance characteristics of MRTS, equipped with a drilling rig, and to study scenarios of application of MRTS in the course of geological exploration on the lunar surface. The findings could be useful for further development of MRTS for geological exploration on the Moon's surface as well as for works dedicated to other types of on-planet and robotic vehicles designed to run on the surface of the Moon and Mars.

Keywords: Mobile robotic system; geological exploration on the Moon surface; research moon rover; robot-geologist; drilling rig; manipulation system; ground sampling; scientific studies on the Moon surface.

1. Введение. Исследование и освоение ресурсов Луны является одной из первоочередных задач по изучению космического пространства. Луна — наиболее близкое к Земле крупное небесное тело, источник важных природных ресурсов, уникальная база для проведения астрофизических и других научных исследований, а в перспективе может рассматриваться как опорный пункт для дальних пилотируемых космических путешествий [1, 2]. Усилия, направленные на планомерное освоение Луны, наращиваются космическими агентствами ведущих стран мира [3-5]. Проекты изучения Луны разрабатываются и в России в рамках ФКП 2016-2025 [6-7].

Особую роль на всех этапах освоения Луны будут играть мобильные робототехнические системы (МРТС), способные выполнять транспортные, научные и ряд других задач на ее поверхности. Первые этапы будут осуществляться с помощью только автоматических аппаратов, последующие — с использованием автоматических и пилотируемых луноходов.

Просматривается следующий типоразмерный ряд напланетных транспортных средств, которые будут востребованы в ходе предварительных исследований Луны, развертывания и последующей поддержки функционирования инфраструктуры перспективной лунной базы (ЛБ) [2]:

- ♦ исследовательский луноход (тематическая геологическая и геохимическая съемка в ходе исследовательского поисково-разведочного маршрута с целью определения оптимальных мест размещения лунной инфраструктуры);

- ♦ рабочий луноход (технологические и манипуляционные работы по обслуживанию инфраструктуры ЛБ на этапе ее формирования и дальнейшей эксплуатации, транспортные задачи по перевозке грузов и космонавтов на небольшие расстояния (грузоподъемность лунохода до 500 кг или 810 Н в условиях лунной гравитации)) [8];

- ♦ тяжелый транспортный луноход для перемещения модулей будущей ЛБ и транспортировки космонавтов внутри защищенной герметизированной кабины в течение длительного времени (автономное проживание экипажа из 2-3 человек до 5 суток) [2].

Важным этапом освоения Луны должны стать исследования на ее поверхности с помощью сети стационарных и самоходных научных станций [1, 9, 10]. Проведение тематической геологической съемки и предварительной геологической разведки является важным и необходимым этапом освоения Луны, который должен дать не только обширную научную информацию, но и предоставить сведения, необходимые для оптимального размещения долговременной или периодически обитаемой ЛБ и развертывания первичной промышленной инфраструктуры [1].

Одним из важнейших методов геологической разведки является колонковое бурение, позволяющее произвести прямое измерение мощности реголита [9-11]. Геологическую разведку на поверхности Луны этим методом предполагается осуществлять как с помощью стационарных платформ (при исследованиях в относительно однородных с геоморфологической точки зрения областях), так и с помощью самоходных аппаратов — МРТС, оснащенных буровой установкой. Применение последних наиболее целесообразно в областях, характеризующихся значительной геологической неоднородностью вдоль маршрута движения [1, 10].

2. Направление исследования. В настоящей работе исследуются пути создания МРТС, предназначенной для проведения геологической разведки на поверхности Луны с помощью каротажно-буровой установки (КБУ), а также посредством широкого спектра научных исследований вдоль предполагаемого маршрута. Комплексные исследования в этом направлении проводятся специалистами ГЕОХИ РАН и ГНЦ ЦНИИ РТК при поддержке ФГУП ЦНИИмаш [10, 12-14].

Рассматриваются несколько вариантов возможных маршрутов движения такой МРТС. Перечень необходимых научных исследований в наиболее интересных с геологической точки зрения областях Луны предложен учеными-геологами из ГЕОХИ РАН и предполагает выполнение МРТС следующих функций:

- ◆ передвижение вдоль маршрута протяженностью до 400-500 км;
- ◆ бурение нескольких скважин (до 5) глубиной до 3-6 м с отбором непрерывных колонок лунного грунта с сохранением их полной стратификации;
- ◆ отбор с поверхности Луны образцов лунного грунта в виде фрагментов поверхностного слоя реголита и небольших камней;
- ◆ проведение активных сейсмических исследований (АСИ) с подрывом зарядов ВВ;
- ◆ проведение широкого спектра научных исследований (гравиметрии, магнитометрии, спектрометрии, активные и пассивные сейсмические исследования и др.);
- ◆ развертывание на месте одной из скважин долговременной автоматической научной станции (АНС);
- ◆ доставка и перегрузка собранных образцов общей массой до 100 кг на лунный взлетно-посадочный комплекс (ЛВПК), ожидающий МРТС в одной из промежуточных или в конечной точке маршрута.

Перечисленные функции являются исходными данными для формирования предварительного проектного облика перспективной МРТС. При этом под термином «проектный облик» подразумевается не только общий технический облик системы, принципиальные технические решения по ее составу и устройству, но также и сценарии ее функционирования в ходе проведения упомянутых исследований.

Важная и необходимая особенность геологических исследований с помощью МРТС — доставка отобранных образцов грунта на Землю, что является ключевым моментом предстоящих миссий, несмотря на то, что часть экспресс-исследований предполагается проводить в том числе *in situ* [14].

Актуальность проблемы создания МРТС. Совокупность предъявляемых к МРТС требований наделяет ее рядом уникальных особен-

ностей. Обзор созданных ранее и разрабатываемых в настоящее время стационарных и самоходных аппаратов, оснащенных буровыми установками для проведения исследований на поверхности других небесных тел [12, 15-18], показывает, что аналогов рассматриваемой МРТС не существует. Текущие исследования, проводимые за рубежом по схожим направлениям, во многом ограничены и предполагают бурение неглубоких скважин, проведение краткосрочных миссий с охватом небольших с геологической точки зрения областей (т.е. ограничены по протяженности и продолжительности исследований), не предусматривают доставку образцов грунта на Землю [16-17].

Также важно отметить, что разрабатываемая концепция геологических исследований на поверхности Луны с помощью МРТС учитывает опыт всех предыдущих лунных миссий, как отечественных, так и зарубежных [19].

Создание отечественных напланетных МРТС, оснащенных буровой установкой, позволит:

- ◆ дополнить существующие на текущий момент сведения о строении и происхождении Луны;
- ◆ произвести геологическую разведку и исследование наиболее значимых областей Луны;
- ◆ определить наиболее перспективные районы развертывания временной или постоянно действующей ЛБ, объектов промышленного производства и др.

Постановка задачи исследования. МРТС представляет собой передвижную научно-исследовательскую лабораторию, являясь частью большого комплекса, включающего:

- ◆ МРТС в виде автоматического лунохода, оснащенного КБУ;
- ◆ комплекс информационно-командных каналов связи (ИККС), включающий приемо-передающее оборудование на борту МРТС и в пунктах управления, ретрансляционные станции на поверхности Луны, на лунных орбитальных космических аппаратах (КА) и т.п.;
- ◆ комплекс наземной аппаратуры управления и обработки информации;
- ◆ средства доставки МРТС.

Целью настоящей работы является определение состава МРТС, технического облика и технических требований к ее основным служебным подсистемам. ИККС при этом рассматривается лишь в части, касающейся бортового оборудования МРТС.

Решение задачи определения облика МРТС решается путем проведения проектных работ, включающих:

- ◆ принципиальную конструктивно-компоновочную проработку всех подсистем и узлов МРТС в системе твердотельного САД-моделирования;

- ◆ компьютерное моделирование и расчеты ключевых подсистем МРТС;

- ◆ построение, моделирование и анализ сценариев функционирования МРТС в ходе проведения наиболее значимых операций.

Требования к МРТС. Обоснование требований к составным частям МРТС производится, во-первых, исходя из условий функционирования, во-вторых, исходя из предполагаемых сценариев выполнения поставленных задач.

Условия функционирования МРТС на Луне характеризуются рядом жестких факторов, таких как:

- ◆ отсутствие атмосферы;

- ◆ большие изменения температуры на поверхности (от $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+130\text{ }^{\circ}\text{C}$);

- ◆ пониженная гравитация ($1,62\text{ м/с}^2$);

- ◆ жесткое космическое излучение (радиация);

- ◆ сильная засветка солнечным освещением чувствительных элементов оптических приборов;

- ◆ метеоритная бомбардировка поверхности.

Концепция применения МРТС в соответствии с выводами специалистов ГЕОХИ РАН [10] предполагает ее функционирование в геологических районах с относительно небольшими перепадами высот, что предполагает относительно комфортные условия движения преимущественно по поверхностям с небольшими уклонами. В то же время характерными особенностями рельефа, которые необходимо учитывать, являются россыпи камней и каменные гряды вблизи кратеров. Повышенную опасность представляют отложения рыхлого грунта на склонах кратеров [20-22].

Исходя из проведенного анализа, сформулированы следующие требования по обеспечению подвижности МРТС [13]:

- ◆ передвижение по поверхности Луны с максимальной скоростью на ровной горизонтальной поверхности 5 км/ч ;

- ◆ преодоление уклонов с углом наклона до 20° ;

- ◆ преодоление одиночных препятствий (камней) высотой до $0,25\text{ м}$.

Принципиальное отличие МРТС от всех ранее создававшихся планетоходов состоит в необходимости преодоления пути более чем на порядок превосходящего максимальное расстояние, пройденное земными подвижными аппаратами по поверхности другого небесного

тела [20]. Протяженность предполагаемого маршрута МРТС составляет не менее 400 км. Эта особенность в совокупности с общей спецификой МРТС предопределяет стремление максимально упростить конструкцию шасси с целью обеспечения ее максимальной надежности.

Длительность миссии и беспрецедентная протяженность предполагаемого маршрута также предъявляет особые требования к системе управления МРТС, которая должна обеспечивать помимо дистанционного также автономный режим передвижения с обходом непреодолимых препятствий.

3. Аппаратно-программный комплекс МРТС. Служебные системы МРТС включают: систему передвижения (самоходное шасси), КБУ, манипуляционную систему, систему энергообеспечения, систему терморегулирования, систему управления, систему связи, навигационную систему, систему технического зрения. В качестве полезной нагрузки выступают: комплекс научной аппаратуры (НА), контейнеры для кернов, отобранных из пробуренных скважин, средства хранения и транспортировки проб поверхностного слоя и камней.

Технический облик служебных систем МРТС. Приведем краткие результаты работ по определению проектного облика служебных систем МРТС:

1) шасси МРТС строится на основе шести конструктивно идентичных модулей мотор-колес, которые крепятся к несущей конструкции (раме) лунохода. Каждый модуль представляет собой мотор-колесо, установленное вместе с приводом поворота, посредством рычагов подвески на шите крепления. Выбранная схема шасси обладает рядом значимых для МРТС особенностей, позволяя осуществлять разворот на месте без проскальзывания (зарывания колес в грунт), движение диагональным ходом, а также стояночный режим без применения дополнительных тормозных механизмов — для длительной стоянки или технологических остановок на поверхностях с небольшим уклоном;

2) в качестве основы для построения колесного движителя на данном этапе использованы наработки ВНИИТрансмаш. Колеса МРТС предполагается выполнять в виде металлоупругой конструкции, позволяющей обеспечить требуемые тягово-сцепные свойства;

3) несущая конструкция МРТС включает три основные части: раму, приборный отсек, открытый кузов для размещения автономно работающего выгружаемого на грунт научного оборудования. Предварительная оценка массы несущей конструкции составляет 230 кг;

4) КБУ построена на основе автоматической каротажно-буровой машины (КБМ), в качестве прототипа которой использована установка ЛБ-10 [2, 10]. В состав КБУ помимо каротажно-буровой

машины входят: рама с приводом развертывания, механизм прижатия, контейнеры для проб. Масса КБМ – не более 120 кг, масса КБУ в снаряженном состоянии (с незаполненными пробоотборниками) – не более 180 кг;

5) система энергоснабжения строится на основе аккумуляторных батарей (АКБ) и солнечной батареи (СБ). Расчетная энергоемкость системы составляет 13,25 кВт·ч. Время автономной работы между циклами полного заряда АКБ — 20 ч из расчета непрерывного движения при переходе от одной точки научного интереса к другой длительностью до 10 ч со средней скоростью от 2,5 до 3,0 км/ч (расстояние между точками от 25 до 30 км) и проведения цикла научных исследований на остановках общей длительностью до 10 ч. Перед функционированием КБУ должен быть проведен полный заряд АКБ. Время заряда АКБ от СБ не более 20 ч. Возможна частичная подзарядка АКБ от СБ и от радиоизотопного термоэлектрогенератора (РИТЭГ) во время выполнения фаз движения МРТС и проведения научных исследований на стоянке. Во время лунной ночи МРТС находится в спящем режиме с минимальным энергопотреблением (не более 120 Вт, обеспечиваемых РИТЭГ). Это обусловлено тем, что требование обеспечения полной работоспособности МРТС в течение лунной ночи вызовет неоправданный рост энергоемкости и веса системы энергоснабжения;

6) манипуляционная система МРТС включает шестистепенной манипулятор и магазин сменного инструмента. Манипулятор выполняет: функции поддержки научных исследований, проводимых МРТС в ходе геологической разведки на поверхности Луны; погрузочно-разгрузочные операции; вспомогательные задачи по поддержанию функционирования МРТС и обслуживанию ее отдельных узлов. Выполнение всего спектра задач обеспечивается кинематической схемой манипулятора и применением разрабатываемого в ЦНИИ РТК универсального захватного устройства для крепления одного из четырех инструментов. Грузоподъемность манипулятора составляет 20 кг (32 Н) на вылете 3 м. Контроль рабочей зоны обеспечивается двумя типами телекамер: рабочего поля манипулятора (общее целеуказание и поддержка научных исследований) и рабочей зоны инструмента (детальный контроль операций). С целью изучения минералогического состава реголита и целеуказания на манипуляторе устанавливается инфракрасный спектрометр, размещаемый вместе с двумя телекамерами рабочего поля в отдельном оптическом блоке (ОБМ);

7) комплекс информационных систем лунохода объединяет все измерительные системы МРТС и служит для сбора, преобразования первичной информации с датчиков и выдачи массивов информации с

частотой, обеспечившей безопасность движения таких систем как: система передвижения, манипуляционная система, КБУ. Основными задачами комплекса являются: обеспечение безаварийной работы МРТС, сбор и передача информации о характеристиках взаимодействия МРТС с внешней средой;

8) система навигации обеспечивает локализацию МРТС в пространстве и формирование глобальных и локальных траекторий движения, благодаря применению дублированных каналов получения навигационных данных, используя следующие приборы: радиомаяк, БИНС, астронавигационный датчик, солнечный датчик положения, точный датчик Солнца;

9) СТЗ МРТС состоит из двух подсистем: ближнего и дальнего действия. Система детектирования препятствий в ближней зоне служит для освещения круговой обстановки в непосредственной близости от МРТС — на расстояниях от 0 до 2 м, и основывается на принципе работы систем реконструкции мертвых зон автомобиля, базирующихся на использовании телевизионных камер со сверхширокоугольными объективами («рыбий глаз»). Система детектирования препятствий в дальней зоне работает на дальностях от 2 до 12 м. Эта система основывается на применении комплекса, включающего панорамный ТВ-стерео спектрометр, навигационные камеры и блок детектирования препятствий в дальней зоне, состоящий из расположенных с вертикальной базой источника лазерной структурированной подсветки в виде сканирующей линии и телекамеры. Ожидаемые характеристики разрешающей способности системы составляют от 1 мм до нескольких сантиметров на расстояниях от 1 до 10 м соответственно;

10) система управления МРТС строится на основе дублированной БЦВМ, конструктивно объединенной вместе с блоками управления подсистемами лунохода и блоками силовой автоматики исполнительных устройств в блок управления МРТС;

11) система терморегулирования МРТС гибридного типа (с активными и пассивными элементами) строится на основе системы с жидким рабочим телом. В качестве активных элементов системы выступает блок обогрева МРТС на основе РИТЭГ, горячий и холодный контуры с активной циркуляцией теплоносителя через радиаторные блоки приборов (ватерблоки), локальные электронагреватели. К пассивным средствам относятся: ЭВТИ, нанесение покрытий с соответствующими оптическими коэффициентами на наружные поверхности, создание локальных «тепловых мостов». Эффективная площадь радиатора системы составляет $3,2 \text{ м}^2$ ($2,1 \text{ м}^2$ конструктивно) при мощности тепловыделения до 1700 Вт;

12) система связи МРТС включает радиокomплекс с несколькими каналами с возможностью работы как напрямую с Землей, так и через ретрансляционные орбитальные КА с пропускной способностью до 1 Гбит/с (при работе в сверхвысоких диапазонах частот). Предполагается возможным оснащение МРТС системой перспективной космической оптической связи с пропускной способностью до 6 Гбит/с.

Комплекс научной аппаратуры. Сформирован предполагаемый технический облик и разработаны 3D модели комплекса НА МРТС в составе:

- ◆ комплект для пяти АСИ;
- ◆ магнитометр;
- ◆ гравиметр;
- ◆ георадар;
- ◆ газоанализатор;
- ◆ гамма-спектрометр, нейтронный детектор и импульсный нейтронный генератор (один прибор в двухблочном исполнении);
- ◆ радиометр;
- ◆ лазерный уголкового отражатель;
- ◆ инфракрасный спектрометр;
- ◆ стереопара из двух телекамер рабочего поля манипулятора;
- ◆ комплект АНС.

Дополнительно функции научного оборудования выполняют приборы:

- ◆ радиомаяк, включенный в состав навигационного комплекса МРТС;
- ◆ ТВ-спектрометр, входящий в состав СТЗ.

Также сформирован технический облик устройства для загрузки и хранения отобранных проб грунта. Проведена компоновка всего комплекса НА на борту МРТС. Суммарная масса комплекса НА составляет около 200 кг

Сценарии функционирования МРТС. Разработаны и исследованы компьютерные 3D сценарии функционирования МРТС и ее основных подсистем при проведении геологической разведки на поверхности Луны:

- ◆ бурение скважины и проведение каротажных исследований с помощью КБУ;
- ◆ отбор проб поверхностного слоя реголита с помощью манипулятора;
- ◆ отбор фрагментов обломочных материалов (небольших камней) с поверхности Луны с помощью манипулятора;

- ◆ укладка собранных проб в контейнеры;
- ◆ перегрузка контейнеров с пробами на ЛВПК в конечной точке маршрута;
- ◆ проведение на поверхности Луны экспериментов по АСИ;
- ◆ развертывание на поверхности Луны АНС долговременного действия;
- ◆ выполнение манипулятором вспомогательных задач по обслуживанию систем МРТС.

Разработаны анимационные схемы сценариев и подробные алгоритмы действий при проведении АСИ и развертывании на поверхности Луны модулей АНС.

4. Заключение. В результате исследований сформирован проектный облик перспективной МРТС для геологической разведки на поверхности Луны, определены ТТХ и ТТ к МРТС и ее основным подсистемам [12].

Сформирован проект массовой сводки МРТС. Расчетная масса МРТС составила 1385 кг без учета перевозимого комплекта проб грунта общей массой 100 кг.

Результаты настоящего исследования могут быть использованы в ходе продолжения проектных работ по созданию МРТС.

Отдельно стоит отметить, что мобильная платформа МРТС, разработанная в настоящем проекте, может служить основой и для других луноходов схожего типоразмера, например, — для МРТС, предназначенной для решения задач по обслуживанию элементов инфраструктуры перспективной ЛБ, исследованию проектного облика которой была посвящена работа [8], выполненная ранее в ЦНИИ РТК.

Продолжение проектных работ по созданию МРТС для функционирования на поверхности Луны предполагает кооперацию большого числа научно-исследовательских и проектных организаций, производственных центров [12]. Выполненные проектные исследования по формированию предварительного облика системы показали необходимость проведения НИОКР практически по всем составным частям и приборам МРТС.

Литература

1. Фундаментальные космические исследования. Кн.2: Солнечная система / под научн. ред. Р.Р. Райкунова. // М.: ФИЗМАТЛИТ. 2014. 456 с.
2. Луна — шаг к технологиям освоения Солнечной системы / под научн. ред. В.П. Легостаева и В.А. Лопоты. // М: Энергия. 2011. 584 с.
3. Гендиректор ЕКА поделился планами о строительстве деревни на Луне URL: <http://www.vesti.ru/doc.html?id=2709509> (дата обращения 01.02.2016).

4. Chinese Lunar Exploration Program. China National Space Administration. URL: <http://www.oosa.unvienna.org/pdf/pres/copuos2014/tech-06.pdf> (дата обращения 01.02.2016).
5. Россия и Китай встретятся на Луне в ближайшее время. URL: <http://www.pravda.ru/news/science/15-01-2016/1288974-zajzev-0/> (дата обращения 01.02.2016).
6. Комаров: до полета на Марс Россия намерена построить базу на Луне. URL: <http://ria.ru/space/20151228/1350539455.html> (дата обращения 01.02.2016).
7. "Роскосмос": проекты изучения Луны с помощью автоматов остались в ФКП. URL: <http://ria.ru/space/20151229/1350953314.html> (дата обращения 01.02.2016).
8. Разработка проектного облика мобильного грузового манипулятора для обслуживания элементов инфраструктуры напланетной (лунной) базы: отчет о НИР (заключ.) // ЦНИИ РТК. 2013. 212 с.
9. Слюта Е.Н., Абдрахимов А.М. Инициативный проект создания опорной сети каротажных буровых скважин и долговременных автоматических мини-станций на Луне // Труды международной конференции «Планетоходы и исследование небесных тел». СПб. 2007. С. 45–48.
10. Обоснование и разработка рекомендаций по созданию сети опорных каротажно-буровых скважин ... Разработка рекомендаций по рациональному сочетанию и взаимодействию стационарных автоматических посадочных аппаратов и тяжелых поисково-разведочных луноходов с буровой установкой для исследования и освоения Луны с участием пилотируемых аппаратов: отчет о НИР (заключ.) // ГЕОХИ РАН. 2013. 154 с.
11. Drilling in Extreme Environments. Penetration and Sampling on Earth and other Planets / Edited by Y. Bar-Cohen, K. Zacny; with a forward by H.H. Schmitt, W.D. Carrier // WILEY-VCH Verlag GmbH&Co. KGaA. 2009. 767 p.
12. Проектно-поисковые исследования по определению технического облика и тактико-технических характеристик мобильной робототехнической системы для проведения геологической разведки на поверхности Луны. Разработка предложений в проект ТЗ на ОКР по созданию мобильной робототехнической системы: отчет о НИР (заключ.) // ЦНИИ РТК. 2015. 303 с.
13. Васильев А.В. Обоснование требований к мобильной робототехнической системе для геологической разведки на поверхности Луны // Экстремальная робототехника: Труды международной научно-технической конференции. СПб: Политехника-сервис, 2015. С. 186–191.
14. Котляр П. Россия запустит луноход-интеллектуал. URL: http://www.gazeta.ru/science/2015/11/23_a_7904099.shtml (дата обращения 23.11.2015).
15. Young A.H. Lunar and Planetary Rovers. The wheels of Apollo and the Quest for Mars // Springer, Praxis Publishing, 2007. 393 p.
16. Bartlett P., Wettergreen D., Whittaker W.L. Design of the Scarab Rover for Mobility and Drilling in the Lunar Cold Traps // International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space. 2008. URL: http://www.ri.cmu.edu/pub_files/2009/1/09aiaa.scarab.pdf (дата обращения 01.02.2016).
17. RESOLVE. Lunar Ice/Volatile Payload Development And Field Test Status // Presentation to LEAG. 2012. URL: <http://www.lpi.usra.edu/meetings/leag2012/presentations/Sanders.pdf> (дата обращения 01.02.2016).
18. Крылов И. «Нефритовый заяц» рассказал о Луне // Дата публикации 23.12.2015. URL: http://www.gazeta.ru/science/2015/12/23_a_7985801.shtml (дата обращения 01.02.2016).

19. Формирование концепции и разработка программы фундаментальных исследований и практического освоения Луны на период 2020-2030 гг... : отчет о НИР (заключ.) // ГЕОХИ РАН. М. 2015. 135 с.
20. Кемурджиан А.Л. и др. Планетоходы / под ред. А.Л. Кемурджиана. 2-е изд., перераб. и доп. // М.: Машиностроение. 1993. 400 с.
21. Передвижная лаборатория на Луне Луноход-1 / под ред. В.Л. Барсукова // М.: Наука. 1978. Т. 2. 184 с.
22. Передвижная лаборатория на Луне Луноход-1 / под ред. А.П. Виноградова // М.: Наука, 1971. Т. 1. 12 с.

References

1. *Fundamental'nye kosmicheskie issledovaniya. Kn.2: Solnechnaja sistema* [Fundamental space research. Book 2. Solar system]. Edited by Rykunov R.R. М.: FIZMATLIT. 2014. 456 p.
2. *Luna — shag k tehnologijam osvoenija Solnechnoj sistemy* [The Moon is a step to Solar system exploration]. Edited by V. P. Legostaev, V. A. Lopota. М.: RKK "Energy". 2011. 584 p.
3. Gendirektor EKA podelilsja planami o stroitel'stve derevni na Lune [CEO ESA shared their plans about the construction of the village on the moon]. Available at: <http://www.vesti.ru/doc.html?id=2709509&cid=2161> (accessed: 01.02.2016).
4. Chinese Lunar Exploration Program China National Space Administration. Available at: <http://www.oosa.unvienna.org/pdf/pres/copuos2014/tech-06.pdf> (accessed: 01.02.2016).
5. Rossiya i Kitaj vstretjatsja na Lune v blizhajshee vremja [Russia and China will meet on the Moon in the near future]. Available at: <http://http://www.pravda.ru/news/science/15-01-2016/1288974-zajzev-0/> (accessed: 01.02.2016).
6. Komarov: do poleta na Mars Rossiya namerena postroit' bazu na Lune [Komarov: to fly to Mars Russia intends to build a base on the moon]. Available at: <http://ria.ru/space/20151228/1350539455.html> (accessed: 01.02.2016).
7. "Roskosmos": proekty izuchenija Luny s pomoshh'ju avtomatov ostalis' v FKP ["Roscosmos": projects exploring the moon with automatic rifles remained in the FSP] Available at: <http://ria.ru/space/20151229/1350953314.html> (accessed: 01.02.2016).
8. *Razrabotka proektnogo oblika mobil'nogo gruzovogo manipulatora dlja obsluzhivaniya jelementov infrastruktury naplanetnoj (lunnoj) bazy: otchet o NIR (zakljuch.)* [Development of the design and appearance of the mobile cargo manipulator for maintenance of infrastructure on-planet (moon) base: research reports (enclosed.)]. RTC. SPb. 2013. 212 p.
9. Sluta E. N., Abdрахimov A. M. [Initiative project creation of a support network logging boreholes and durable automatic mini-stations on the moon]. *Trudy mezhdunarodnoj konferencii «Planetohody i issledovanie nebesnyh tel»* [Proceedings of the international conference "Space rovers and the study of celestial bodies"]. 2007. pp. 45–48.
10. *Obosnovanie i razrabotka rekomendacij po sozdaniju seti opornyh karotazhno-burovyh skvazhin ... Razrabotka rekomendacij po racio-nal'nomu sochetaniju i vzaimodejstviju stacionarnykh avtomaticheskikh posadochnykh apparatov i tjazhelyh poiskovo-razvedochnykh lunohodov s burovoj ustanovkoj dlja issledovaniya i osvoenija Luny s uchastiem pi-lotiruemykh apparatov: otchet o NIR (zakljuch.)* [Substantiation and development of recommendations on creation of the network of logging-boreholes ... to Develop recommendations for the rational combination and interaction of stationary automatic boarding machines and heavy exploration Rovers with drilling unit for research and exploration of the moon involving manned vehicles: research reports (enclosed.)]. GEOKHI RAS. М. 2013. 154 p.

11. Drilling in Extreme Environments. Penetration and Sampling on Earth and other Planets. Edited by Y. Bar-Cohen and K. Zacny; with a forward by H. H. Schmitt, W. D. Carrier. WILEY-VCH Verlag GmbH&Co. KGaA. 2009. 767 p.
12. *Proektno-poiskovye issledovaniya po opredeleniyu tehniceskogo oblika i taktiko-tehnicheskikh harakteristik mobil'noj robototekhnicheskoy sistemy dlja provedeniya geologicheskoy razvedki na poverhnosti Luny. Razrabotka predlozhenij v proekt TZ na OKR po sozdaniyu mobil'noj robototekhnicheskoy sistemy: otchet o NIR (zakljuch.)* [Exploratory design studies to determine the technical layout and performance characteristics of mobile robotic systems for carrying out geological exploration on the moon's surface. Development of proposals in the TOR to create a mobile robotic system: a research report (enclosed.)]. RTC. SPb. 2015. 303 p.
13. Vasilev A. V. [Substantiation of requirements for a mobile robotic system for exploration on the moon's surface]. *Jekstremal'naja robototekhnika: Trudy mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii* [Extreme robotics: Proceedings of international scientific-technical conference]. SPb: Publishing house "Politehnika-SERVIS". 2015. pp. 186–191.
14. Kotlyar P. Rossiya zapustit lunohod-intellektual [Russia would launch a lunar Rover-the intellectual]. Available at: http://www.gazeta.ru/science/2015/11/23_a_7904099.shtml (accessed: 23.11.2015).
15. Young, A. H. Lunar and Planetary Rovers. The wheels of Apollo and the Quest for Mars. Springer, Praxis Publishing. 2007. 393 p.
16. Bartlett P., Wettergreen D., Whittaker W.L. Design of the Scarab Rover for Mobility and Drilling in the Lunar Cold Traps. International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space, 2008. Available at: http://www.ri.cmu.edu/pub_files/2009/1/09aiaa.scarab.pdf (accessed: 01.02.2016).
17. RESOLVE. Lunar Ice/Volatile Payload Development And Field Test Status. Presentation to LEAG. 2012. Available at: <http://www.lpi.usra.edu/meetings/leag2012/presentations/Sanders.pdf> (accessed: 01.02.2016).
18. Krylov I. «Nefritovyy zajac» rasskazal o Lune ["Yutu" told about the Moon]. Available at: http://www.gazeta.ru/science/2015/12/23_a_7985801.shtml (accessed: 01.02.2016).
19. *Formirovanie koncepcii i razrabotka programmy fundamental'nykh issledovaniy i prakticheskogo osvoeniya Luny na period 2020-2030 gg... : otchet o NIR (zakljuch.)* [The formation of concepts and development programs for fundamental research and practical exploration of the moon for the period of 2020-2030...: research reports (enclosed.)]. GEOKHI RAS. M. 2015. 135 p.
20. Kemurdjian A.L. et al. *Planetohody* [Planetary]. Edited by A. L. Kemurdzhian. 2-e Izd., Rev. and extra. M.: Mashinostroenie, 1993. 400 p.
21. *Peredvizhnaja laboratorija na Lune Lunohod-1* [Mobile laboratory on the Moon Lunokhod-1]. Edited by V. L. Barsukov. M.: Nauka. 1978. vol. 2. 184 p.
22. *Peredvizhnaja laboratorija na Lune Lunohod-1* [Mobile laboratory on the Moon Lunokhod-1]. Edited by A. P. Vinogradov. M.: Nauka. 1971. vol. 1. 128 p.

Васильев Андрей Викторович — ведущий конструктор, Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики (ЦНИИ РТК). Область научных интересов: робототехника наземного и космического назначения, проектирование мехатронных устройств, приводов робототехнических систем. Число научных публикаций — 35. andrey@rtc.ru, <http://rtc.ru>; Тихорецкий пр., 21, Санкт-Петербург, 194064; п.т.: +7(911) 218-57-17.

Vasiliev Andrey Viktorovich — leading designer, Russian State Scientific Center – Saint-Petersburg «Central Research and Design Institute for Robotics and Technical Cybernetics» (CRDI RTC). Research interests: terrestrial and space robotics; designing of mechatronic devices, drives, robotic systems. The number of publications — 35. andrey@rtc.ru, <http://rtc.ru>; 21, Tichoretsky pr., Saint-Petersburg, 194064, Russia; office phone: +7(911) 218-57-17.

Кондратьев Александр Сергеевич — к-т техн. наук, заместитель директора, Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики (ЦНИИ РТК). Область научных интересов: космическая робототехника. Число научных публикаций — 10. kondr@rtc.ru; Тихорецкий пр., 21, Санкт-Петербург, 194064; p.t.: +7(812)552-11-50.

Kondratyev Aleksander Sergeevich — Ph.D., deputy director, Russian State Scientific Center – Saint-Petersburg «Central Research and Design Institute for Robotics and Technical Cybernetics» (CRDI RTC). Research interests: space robotics. The number of publications — 10. kondr@rtc.ru; 21, Tichoretsky pr., Saint-Petersburg, 194064, Russia; office phone: +7(812)552-11-50.

Градовцев Алексей Андреевич — заместитель главного конструктора, Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики (ЦНИИ РТК). Область научных интересов: космическая робототехника. Число научных публикаций — 10. a.gradovtsev@rtc.ru; Тихорецкий пр., 21, Санкт-Петербург, 194064; p.t.: (812)552-60-93.

Gradovtsev Aleksey Andreevich — deputy chief designer, Russian State Scientific Center – Saint-Petersburg «Central Research and Design Institute for Robotics and Technical Cybernetics» (CRDI RTC). Research interests: space robotics. The number of publications — 10. a.gradovtsev@rtc.ru; 21, Tichoretsky pr., Saint-Petersburg, 194064, Russia; office phone: (812)552-60-93.

Даляев Игорь Юрьевич — начальник сектора, Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики (ЦНИИ РТК). Область научных интересов: космическая робототехника. Число научных публикаций — 27. igor@rtc.ru; Тихорецкий пр., 21, Санкт-Петербург, 194064; p.t.: +7(812)552-60-93.

Dalyaev Igor Yurievich — head of sector, Russian State Scientific Center – Saint-Petersburg «Central Research and Design Institute for Robotics and Technical Cybernetics» (CRDI RTC). Research interests: space robotics. The number of publications — 27. igor@rtc.ru; 21, Tichoretsky pr., Saint-Petersburg, 194064, Russia; office phone: +7(812)552-60-93.

Поддержка исследований. ФГУП ЦНИИмаш; ГЕОХИ РАН.

Acknowledgements. TSNIIMASH; Russian Academy of Sciences GEOHI institute.

РЕФЕРАТ

Васильев А.В., Кондратьев А.С., Градовцев А.А., Далаев И.Ю.
Исследование и разработка проектного облика мобильной робототехнической системы для проведения геологической разведки на поверхности луны.

Исследуются пути создания мобильной робототехнической системы для геологической разведки на поверхности Луны. Проведение тематической геологической съемки и предварительной геологической разведки является важным и необходимым этапом освоения Луны, который должен дать не только обширную научную информацию, но и предоставить сведения, необходимые для оптимального размещения долговременной или периодически обитаемой лунной базы и развертывания первичной промышленной инфраструктуры на поверхности Луны. Геологическую разведку на поверхности Луны предполагается выполнять методом колонкового бурения, а также посредством широкого спектра научных исследований, как с помощью стационарных научных станций, так и с помощью мобильных аппаратов. Научная программа комплекса таких исследований разработана учеными-геологами из института ГЕОХИ РАН. Целью настоящего проекта, осуществляемого в ЦНИИ РТК, является формирование проектного облика мобильной робототехнической системы, оснащенной каротажно-буровой установкой, манипуляционной системой и комплексом научной аппаратуры, которые необходимы для выполнения предъявляемых к системе требований функционального назначения: маршрут движения протяженностью 400-500 км; бурение в нескольких точках маршрута скважин глубиной 3-6 м с отбором кернов с сохранением их полной стратификации; проведение широкого спектра научных исследований, включая: гравиметрию, магнитометрию, активные и пассивные сейсмические исследования и др.; развертывание на месте одной из скважин научной станции долговременного действия, отбор по ходу движения фрагментов поверхностного слоя реголита и небольших камней; доставка и перегрузка собранных образцов общей массой до 100 кг на лунный взлетно-посадочный комплекс. Кратко излагаются результаты проектных работ и поисковых исследований по формированию предполагаемого проектного облика мобильной робототехнической системы, включающего: ее общий технический облик, принципиальные технические решения по ее составу, устройству и техническому облику всех основных подсистем, сценарии функционирования такого робота-геолога в ходе проведения исследований на поверхности Луны. Работа выполнена при поддержке ФГУП ЦНИИмаш.

SUMMARY

Vasiliev A.V., Kondratyev A.S., Gradovtsev A.A., Dalyaev I.Yu. **Research and Development of Design Shape of a Mobile Robotic System for Geological Exploration on the Moon's Surface.**

Ways of creation of a mobile robotic system for geological investigation on the Moon surface are considered. Thematic geological survey and preliminary geological investigation are an important and necessary stage of the exploration of the Moon, during which not only extensive scientific information is provided, but also the information necessary for optimum placement of a long-term or periodically manned lunar base and for expansion of primary industrial infrastructure on the Moon surface. Geological investigation on the surface of the Moon is supposed to be conducted using a method of column drilling and also by means of a wide range of scientific studies, including with the help of stationary scientific stations and mobile vehicles. The scientific program of such studies is developed by geologists from V.I. Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of the Russian Academy of Sciences (GEOHI RAS). The purpose of the present project, which is carried out in Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics, is to design a mobile robotic system equipped with the drilling rig, a manipulation system and a complex of the scientific equipment, which are necessary for implementation of requirements of a functional purpose: 400-500 km long route; drilling in several points of a route of wells of 3-6 m in depth with selection of cores with preservation of their full stratification; carrying out a wide range of scientific researches, including: gravimetry, magnetometry, active and passive seismic experiments, etc.; deploying near one of wells of a long-action scientific station, sampling of fragments of regolith's surface and small stones; shipping and handling of collected samples of a total weight of up to 100 kg on the lunar landing complex. The paper briefly discusses the results of design works and research studies on the formation of the estimated design shape of a mobile robotic system which includes its general technical design; basic technical solutions on its structure and technical design of all main subsystems; scenarios of functioning of such a robot-geologist during researches on the Moon surface. The project is supported by the Federal State Unitary Enterprise TsNIIMash.

О.В. ДВОРНИКОВ, Н.Н. ПРОКОПЕНКО, Н.В. БУТЫРЛАГИН, А.В. БУГАКОВА
**ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ НОВЫХ МИКРОСХЕМ
БАЗОВОГО МАТРИЧНОГО И БАЗОВОГО СТРУКТУРНОГО
КРИСТАЛЛОВ В ДАТЧИКОВЫХ СИСТЕМАХ**

Дворников О.В., Прокопенко Н.Н., Бутырлагин Н.В., Бугакова А.В. **Перспективы применения новых микросхем базового матричного и базового структурного кристаллов в датчиковых системах.**

Аннотация. Приведены краткие сведения о существующих интегральных схемах (ИС) базового матричного (БМК) и базового структурного (БСК) кристаллов отечественного и иностранного производства, ориентированных на применение в датчиковых системах, в том числе роботов различного назначения и летательных аппаратах.

Рассмотрены структуры новых микросхем БМК (АБМК-2.1) и БСК (МН2ХА010), а также перспективы проектирования на их основе радиационно-стойких ИС для аналоговой обработки сигналов и интерфейсов датчиков различной физической природы.

Ключевые слова: базовый матричный кристалл, базовый структурный кристалл, аналоговый интерфейс, аналоговый процессор, датчиковые системы, радиационная стойкость, робототехнический комплекс, мобильный робот.

Dvornikov O.V., Prokopenko N.N., Butyrlagin N.V., Bugakova A.V. **Perspectives of application of new chips of analog master slice array and configurable structured array of crystals in the sensor systems.**

Abstract. Summary information on existing integrated circuits (IC) analog master slice array (MSA) and configurable structured array (CSA) crystals of domestic and foreign production-oriented applications in sensor systems, including robots for various purposes, and aircraft are reduced.

The parameters of the new integrated circuits MSA (AGAMC-2.1) and CSA (MH2XA010), as well as the prospects of designing on their basis of radiation-resistant IC for analog signal processing and interfaces of sensors of different physical kind.

Keywords: analog master slice array, configurable structured array, analog interface, analog processor, sensor systems, radiation hardness, robotic complex, mobile robot.

1. Введение. Целью настоящей статьи является рассмотрение основных характеристик существующих, а также новых (2016 г.) микросхем БМК и БСК, предназначенных для проектирования и производства многоканальных (до восьми каналов) радиационно-стойких аналоговых интерфейсов различных датчиков.

Существенное отличие параметров и условий эксплуатации датчиков различной физической природы приводит к необходимости использования разнообразных схем интерфейсов [1]. В ряде случаев серийно выпускаемые микросхемы аналоговых интерфейсов не соответствуют предъявляемым требованиям, например, из-за отсутствия радиационной стойкости. Поэтому актуальным является проектирование и малосерийное производство специализированных ИС, ориентированных на применение в датчиковых системах в условиях радиации

и низких температур. Заметим, что данные дестабилизирующие факторы оказывают одинаковое влияние на деградацию (в 5-10 раз) коэффициента усиления по току базы (β) биполярных транзисторов (БТ).

2. Российские и зарубежные БМК для построения микросхем аналоговых интерфейсов. Концепция БМК предполагает предварительное изготовление полупроводниковых пластин со сформированной матрицей несоединенных базовых ячеек, а также наличие библиотеки стандартных элементов и комплекса программ для схемотехнического и топологического проектирования полужаказных ИС [2, 3].

В настоящее время для создания высококачественных аналоговых интерфейсов применяются зарубежные БМК на БТ, допускающие работу при напряжении питания до ± 6 В, например, такие как: AN930, AN931, AN940, AN941 фирмы Panasonic [4], QuickChip10 фирмы Maxim [5], B150A, B250A, B500A, B1000A фирмы TEMIC [6], АБМК 1.3 [7]. Из указанных БМК выделим АБМК-1.3 (ОАО «МНИПИ» г. Минск), на котором создана серия аналоговых ИС, радиационная стойкость которых подтверждена экспериментально [8, 9].

Универсальность БМК обуславливает их широкое распространение. Так, в настоящее время изготовление аналоговых микросхем возможно на основе следующих БМК российского производства [3]:

- НПО «Автоматики», содержащем биполярные п-р-п транзисторы с граничной частотой $f_T > 0,8$ ГГц, р-п-р с $f_T > 0,6$ ГГц, металлические резисторы и МОП-конденсаторы;

- «Руль» 5515ХТ ОАО «Ангстрем», выполненном по БиКМОП-технологии с $f_T > 1,5$ ГГц/п-р-п и $f_T > 0,5$ ГГц/р-п-р;

- К1451БК1У, созданном по КМОП-технологии дизайн-центром «Союз» и ОАО «Ангстрем»;

- НБК1501Т, выполненном по КМОП-технологии на ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю.Е. Седакова»;

- серии изделий ОАО НИИТАП, в том числе аналоговых БМК «Сигналист» ($f_T < 2,5$ ГГц/п-р-п и $f_T < 1,5$ ГГц/р-п-р), «Старт» ($f_T < 0,9$ ГГц/п-р-п и $f_T \ll 0,1$ ГГц/р-п-р) и «Лидер» ($f_T < 3,0$ ГГц/п-р-п и $f_T < 0,15$ ГГц/р-п-р).

К сожалению, существующие российские БМК не всегда удовлетворяют разработчиков аналоговых интерфейсов:

- не обеспечивают требуемую радиационную стойкость;

- обычно не позволяют создавать многоканальные ИС;

- во многих БМК отсутствуют активные элементы для синтеза маломощных аналоговых устройств, работающих с емкостными источниками сигналов;

- содержат большое количество КМОП-элементов, применение которых в аналоговых устройствах ограничено из-за высокого уровня низкочастотных шумов и вносимых статических погрешностей [2];

– используют избыточные для ряда применений конструктивные решения, увеличивающие стоимость изготовления полупроводниковых кристаллов.

3. Краткие сведения о новом базовом матричном кристалле АБМК-2.1. В 2016 г. в ОАО «МНИПИ» при участии «Института ядерных проблем» Белорусского государственного университета и Донского государственного технического университета разработан новый БМК типа АБМК-2.1, ориентированный на применение в радиационно-стойких датчиковых системах различного назначения. При этом существующий технологический маршрут изготовления микросхем [11] доработан для обеспечения граничной частоты n - p - n транзисторов более 2,2 ГГц, p - n - p — более 1,5 ГГц, напряжение пробоя коллектор-эмиттер всех БТ — более 14 В и формирование JFET с каналом p -типа (p JFET).

Дополнительным преимуществом модернизированного технологического маршрута является малое радиационное изменение граничной частоты f_T , одинаковое изменение коэффициента усиления тока базы (β) и напряжения база-эмиттер p - n - n - и p - n - p - транзисторов при воздействии флюенса электронов $F_E = 3 \cdot 10^{14}$ эл/см² с энергией 4 МэВ и поглощенной дозе $D_G = 3$ Мрад гамма-излучения ⁶⁰Co, обеспечивающее разработку аналоговых ИС, малочувствительных к воздействию ионизирующего излучения.

Микросхема АБМК-2.1 содержит четыре идентичных блоков, каждый из которых состоит из двух макроячеек, позволяющих создать аналоговую ИС малой степени интеграции: ОУ, компаратор, зарядочувствительный усилитель (ЗЧУ), ОТА-усилитель (operational transconductance amplifier).

Всего АБМК-2.1, кроме большого количества резисторов и конденсаторов, имеет следующие транзисторы:

- малосигнальные pnp — 288 шт.
- малосигнальные pnp — 288 шт.
- мощные pnp — 8 шт.
- мощные pnp — 12 шт.
- мощные $pППП$ — 36 шт.

Мощные p JFET рекомендуется использовать во входных цепях малошумящих аналоговых ИС.

4. Особенности микросхем базовых структурных кристаллов. Основное отличие БСК от БМК заключается в том, что в БСК некоторые соединения элементов выполнены заранее. Таким образом, БСК представляют собой спроектированную и изготовленную полупроводниковую пластину, обычно содержащую блоки памяти, интерфейс ввода-вывода, функциональные аналоговые блоки и матрицу несоединенных элементов. Для специализации БСК также формируются

соединения элементов на полупроводниковом кристалле, но проектирование выполняется на уровне IP-модулей блоков. При этом часто указывают, что БСК имеют структуру «море модулей» по сравнению с «морем вентилях» во многих БМК.

Применение в БСК апробированных и сертифицированных аналоговых блоков существенно уменьшает риск проектирования ИС и позволяет оценить радиационную стойкость создаваемой радиоэлектронной аппаратуры на начальных этапах ее проектирования.

По мнению ряда зарубежных специалистов, проектирование полужаказных микросхем на БМК, выполненных по КМОП-технологии, в большинстве случаев не позволило достичь высокого уровня параметров аналоговых устройств, хотя для цифровых изделий оказалось вполне успешным. Такая ситуация объясняется тем, что характеристики КМОП аналоговых схем в большой степени определяются выполнением топологии [12]. Поэтому БСК, в которых аналоговые ячейки разработаны на БТ по правилам проектирования заказных схем, имеют преимущество перед КМОП БМК.

Из серийно выпускаемых зарубежными фирмами БСК следует выделить:

- аналого-цифровые БСК фирмы Gigoptix, содержащие до 500 полностью сформированных (с металлом) ячеек входа/выхода, логические вентиля, память и др. [13];

- XPressArray-II (ХРА-II) фирмы ON Semiconductor, изготовленный по технологии фирмы AMI Semiconductor, в том числе для использования в военных целях (М-ХРА-II). Такие БСК предназначены для перевода проектов, выполненных на ПЛИС типа Altera АРЕХ-II и Stratix, XilinxVirtexII, в полужаказные ИС [14];

- цифровой БСК фирмы Faraday, содержащий сформированные и программируемые металлом блоки. В числе сформированных блоков — ОЗУ, логические вентиля, блоки дискретного преобразования Фурье, сдвиговые регистры, устройства самотестирования, JTAG периферийное сканирование, высокоскоростные ячейки ввода/вывода и IP-блоки. Логические вентиля, триггеры и структуры высокого уровня могут быть сконфигурированы для получения требуемых системных функций [15];

- радиационно-стойкий аналого-цифровой БСК ViArray фирмы Sandia, в котором требуемая конфигурация системы реализуется изменением фотошаблона межуровневого контакта и одного металла [16, 17]. Кристалл содержит следующие аналоговые, смешанные и пассивные элементы: 8 АЦП двух типов, восемь 8-разрядных ЦАП, девять 32-канальных мультиплексоров, 48 ОУ общего назначения, 64 компаратора, 128 аналоговых ключей, 4 ИОН, высокоскоростное

УВХ, 2 температурных датчика, матрицу резисторов с сопротивлением 2 кОм, матрицу МОП-конденсаторов с емкостью 2 пФ.

Наиболее ориентированными на изготовление аналоговых устройств являются БСК серии VCA (Via Configurable Analog) фирмы Triad Semiconductor [18, 19].

Конструкция серии кристаллов VCA защищена патентами США. Серия содержит следующие аналого-цифровые изделия: VCA-1 VCA-12, Mocha-1, TSX1001 и RF-VCA. При этом для создания интерфейсов датчиков наиболее пригодны кристаллы VCA-3, 4, 5, 8 и 12. Кристалл типа VCA-4 изготовлен по КМОП технологическому маршруту фирмы AMS с проектной нормой 0,35 мкм и включает 6 маломощных аналоговых ячеек, имеющих дифференциальный вход и парафазный выход; 6 маломощных малощумящих аналоговых ячеек с однофазным выходом; 12 ячеек с широкополосными, малощумящими ОУ; 1 маломощный источник, задающий режимы работы аналоговых устройств; ячейку с высокоомными сопротивлениями; два 10-разрядных цифровых потенциометра; датчик температуры; маломощную логику и электрически стираемое программируемое ПЗУ (ЭСП ПЗУ).

Кристаллы VCA-3, 5, 8 содержат один тип аналоговой ячейки и различаются, главным образом, функциональными возможностями.

Кристалл малой площади VCA-12 изготовлен по КМОП-технологии фирмы ИТАР с проектной нормой 0,18 мкм и допускает работу с повышенными (до 12 В) напряжением питания и током нагрузки.

В последнее время фирмы Triad и Sandia начали совместные работы по созданию радиационно-стойкого БСК для аэрокосмических и военных применений на основе наработок Triad в серии VCA и КМОП технологического маршрута типа кремний на изоляторе (Silicon on Insulator, SOI) с проектной нормой 0,35 мкм фирмы Sandia [20].

Из серийно выпускаемых БСК интерес для робототехники представляют следующие:

– ТА-1-2-4, ТА-1-1-3, ТА-1-4-8 фирмы New Japan Radio, содержащие ОУ, вертикальные p-p-n БТ, горизонтальные p-p-n БТ, активные и пассивные элементы [21];

– серия RLA/RFA фирмы Svenska Grindmatriser, особенно RFA120, включающий ОУ с головным JFET, БТ, RC-элементы [22];

– VCA-12 фирмы Triad Semiconductor [18], созданный специально для обработки сигналов датчиков. Он включает небольшую цифровую часть и минимальное количество аналоговых блоков, достаточное для реализации большинства требуемых функций предварительной обработки сигналов датчиков, а его напряжение питания составляет 12 В. Основным недостатком VCA-12 является отсутствие малощумящих усилителей и радиационной стойкости [17].

ры, зарядочувствительные усилители и др.) и матрицу несоединенных элементов. Проектирование конкретной ИС в этом случае выполняется на уровне СФ-блоков за счет разводки межсоединений элементов.

Базовый структурный кристалл МН2ХА010 (основной разработчик – ОАО «МНИПИ» при участии Донского государственного технического университета и «Института ядерных проблем» Белорусского государственного университета) содержит 6 функциональных ячеек с аналоговыми IP-модулями, активными и пассивными элементами.

В структуре БСК используются апробированные и сертифицированные аналоговые IP-модули, что позволяет оценить радиационную стойкость создаваемой радиоэлектронной аппаратуры на начальных этапах ее проектирования [8-10, 24-28].

БСК состоит из 8-ми одинаковых усилительных блоков и 1-го дополнительного канала.

Каждый усилительный блок включает:

– функциональную ячейку ФЯ1 (рисунок 1), содержащую двоярный входной повторитель напряжения с головными р-ПТП, 12 резисторов типа 2R8u (последовательное соединение резисторов с сопротивлением 0,65 кОм и 1,4кОм) и 2 резистора с сопротивлением 1,4 кОм;

– ФЯ2, содержащую ОТА-усилитель, 2 конденсатора с емкостью 0,5 пФ, 6 конденсаторов с емкостью 1 пФ, 6 резисторов 2R8u, 12 резисторов с сопротивлением 1,4 кОм;

– ФЯ3, содержащую маломощный повторитель напряжения, 12 резисторов с сопротивлением 0,65 кОм, 6 резисторов 2R8u и 16 резисторов типа 2R4u (последовательное соединение резисторов с сопротивлением 1,4 кОм и 2,7 кОм);

– ФЯ4, выходной повторитель напряжения (рисунок 1);

– БЯ7, базовую ячейку (рисунок 1), содержащую 69 конденсаторов с емкостью 0,5 пФ, 110 резисторов 2RR4u (последовательное соединение резисторов с сопротивлением 5,5 кОм и 11 кОм);

– БЯ8, содержащую 3 конденсатора с емкостью 0,5 пФ и 6 резисторов 2R4u;

– малошумящие (мощные) n-p-n- транзисторы (9), малошумящие (мощные) p-n-p- транзисторы (10).

В дополнительный канал входят:

– ФЯ5, содержащая ЗЧУ, 4 конденсатора с емкостью 1 пФ, 2 резистора 2R8u, 2 резистора 2R4u;

– ФЯ6, содержащая компаратор, 3 резистора 2R8u, 6 резисторов 2R4u.

Перед каждым ЗЧУ размещены защитные диоды (11).

По периметру кристалла БСК расположено 80 контактных площадок (12).

Отметим, что аналоговые ИС, близкие по схемотехнике функциональным ячейкам БСК, ранее были изготовлены и успешно испытаны при воздействии ионизирующего излучения [8, 10]. На основании этого можно утверждать, что созданный БСК является радиационно-стойким.

Таким образом, наличие в новом базовом структурном кристалле МН2ХА010 достаточно большого количества заранее сформированных активных компонентов может стать основой для проектирования радиационно-стойких аналоговых процессоров и преобразователей сигналов различного назначения [25-28], в том числе операционных, мультидифференциальных и инструментальных усилителей основных модификаций, малощумящих и зарядочувствительных усилителей, RC-фильтров, мостовых измерительных схем, пьезо- и биосенсоров, функциональных генераторов сигналов, приемников дифференциальных линий связи, многоканальных активных сумматоров потенциальных сигналов, пьезоэлектрических датчиков ускорения, управляемых усилителей, амплитудных детекторов, дифференциальных преобразователей емкости, усилителей мощности с аддитивной коррекцией нелинейных искажений, дифференциальных и мультидифференциальных усилителей токов, преобразователей сигналов кремниевых фотодиодов и многоэлементных фотоприемников, прецизионных источников опорного напряжения, логических элементов с токовым преобразованием сигналов, схем подавления шумов в стабилизаторах напряжения, аналоговых ключей, компараторов АЦП и т.д.

6. Заключение. В условиях мелкосерийного производства создание аналоговых устройств для датчиковых систем роботов различного назначения экономически выгодно на основе БМК и БСК.

Универсальность БМК обуславливает их широкое распространение для производства специализированных аналоговых ИС. В то же время по ряду причин существующие зарубежные и российские БМК не в полной мере удовлетворяют разработчиков интерфейсов датчиков.

Наиболее подходящими для проектирования интерфейсов датчиков являются БСК фирмы Triad Semiconductor. Однако эти изделия спроектированы максимально универсальными, содержат большую цифровую часть и избыточное количество аналоговых блоков, что увеличивает конечную стоимость изделия. Кроме того, БСК фирмы Triad Semiconductor не обеспечивают требуемый уровень радиационной стойкости и малопригодны для проектирования многоканальных ИС.

При проектировании и производстве высококачественных радиационно-стойких аналоговых интерфейсов роботов и беспилотных лета-

тельных аппаратов целесообразно применение новых БМК (АБМК-2.1) и БСК (МН2ХА010), изготовленных по модернизированному технологическому маршруту, обеспечивающему граничную частоту $n-p-n$ -транзисторов более 2,2 ГГц, $p-n-p$ — более 1,5 ГГц, напряжение пробоя коллектор-эмиттер всех БТ — более 14 В и формирование одновременно с БТ полевых JFET для синтеза малошумящих усилителей. Дополнительным преимуществом элементной базы БМК и БСК является малое радиационное изменение граничной частоты f_T , одинаковое изменение коэффициента усиления тока базы и напряжения база-эмиттер $n-p-n$ - и $p-n-p$ - транзисторов при воздействии флюенса электронов $F_E = 3 \cdot 10^{14}$ эл/см² с энергией 4 МэВ и поглощенной дозе $D_G = 3$ Мрад гамма-излучения ⁶⁰Со, обеспечивающее разработку аналоговых ИС, малочувствительных к воздействию ионизирующего излучения.

Микросхема АБМК-2.1 содержит четыре идентичных блока, каждый из которых включает две макроячейки, позволяющие создать аналоговую ИС малой степени интеграции: ОУ, компаратор, ЗЧУ, ОТА-усилитель.

Микросхема БСК МН2ХА010 состоит из 8-ми одинаковых усилительных блоков и дополнительного канала. Каждый усилительный блок включает сдвоенный входной повторитель напряжения с головными JFET, два ОТА-усилителя, два маломощных повторителя напряжения, выходной повторитель напряжения, малошумящие $n-p-n$ - и $p-n-p$ - транзисторы, резисторы и конденсаторы. В дополнительный канал входят два зарядочувствительных усилителей с защитными диодами, два компаратора, резисторы и конденсаторы.

Главным преимуществом разработанных БСК является применение ранее апробированных и сертифицированных блоков, что уменьшает риск проектирования, снижает требования к квалификации разработчиков ИС, значительно упрощает и ускоряет создание радиационно-стойких микроэлектронных интерфейсов.

Результаты успешных радиационных испытаний аналоговых блоков, близких по схемотехнике к компонентам МН2ХА010, позволяют утверждать, что разработанные БМК и БСК являются радиационно-стойким при воздействии флюенса электронов $3 \cdot 10^{14}$ эл/см² с энергией 4 МэВ и поглощенной дозе 3 Мрад гамма-излучения ⁶⁰Со.

Микроэлектронные интерфейсы для широкой номенклатуры датчиков различного назначения могут быть реализованы в виде систем в корпусе, объединяющих несколько полупроводниковых кристаллов, например, аналоговой части, выполненной на БМК и БСК, и цифровых КМОП IP-модулей.

Литература

1. *Дворников О., Чеховский В., Дятлов В., Прокопенко Н.* Особенности аналоговых интерфейсов датчиков. Часть 2 // Современная электроника. 2013. № 3. С. 58–63.
2. *Абрамов И.И., Дворников О.В.* Проектирование аналоговых микросхем для прецизионных измерительных систем // Минск: Акад. упр. при Президенте Респ. Беларусь. 2006. 286 с.
3. *Прокопенко Н.Н., Дворников О.В., Крутчинский С.Г.* Элементная база радиационно-стойких информационно-измерительных систем // Шахты: ФГБОУ ВПО «ЮРГУЭС». 2011. 208 с.
4. Analog Master Slice Service. URL: <http://www.semicon.panasonic.co.jp/en/products/analog-master-slice/> (дата обращения: 20.02.2016).
5. Semicustom QuickChip ASICs Implement RF Functions to 9GHz. URL: <https://www.maximintegrated.com/en/app-notes/index.mvp/id/646> (дата обращения: 20.02.2016).
6. Analog ASICs. URL: <http://www.datasheetarchive.com/dl/Datasheet-054/DSA0018514.pdf> (дата обращения: 20.02.2016).
7. *Baturitsky M.A., Dvornikov O.V., Tchekhovskiy V.A.* An analog bipolar-JFET master slice array for front-end electronics design // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. 2003. vol. 498. no 1. pp. 443–452.
8. *Дворников О.В., Чеховский В.А., Дятлов В.Л., Богатырев Ю.В., Ластовский С.Б.* Влияние быстрых электронов на аналоговые интегральные элементы и схемы // Вопросы атомной науки и техники. Серия: физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2012. Выпуск 3. С. 54–59.
9. *Дворников О.В., Чеховский В.А., Дятлов В.Л., Богатырев Ю.В., Ластовский С.Б.* Радиационно-стойкие аналоговые интегральные схемы // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем. М.: ИПИМ РАН. 2012. С. 280–283.
10. *Dvornikov O.V., Tchekhovskiy V.A., Dzatlaui V.L., Prokopenko N.N.* Influence of Ionizing Radiation on the Parameters of an Operational Amplifier Based on Complementary Bipolar Transistors // Russian Microelectronics. 2016. vol. 45. no 1. pp. 54–62.
11. *Baturitsky M.A., Dvornikov O.V., Reutovich S.I., Solomashenko N.F.* Multichannel monolithic frontend system design. Part 2. Microwave bipolar-JFET process for low-noise charge-sensitive preamplifiers // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. 1996. vol. 378. no 3. pp. 570–576
12. *Clein D.* CMOS IC layout: concepts, methodologies, and tools // Newnes. 1999. 281 p.
13. Structured ASIC. Gigoptix. URL: www.gigoptix.com/products/39-structuredasic. (дата обращения: 20.02.2016).
14. ON Semiconductor Delivers Structured ASIC Technology for Military and Aerospace SoCs and FPGAto8ASIC Conversions. URL: www.onsemi.com/PowerSolutions/newsItem.do?article=1734. (дата обращения: 20.02.2016).
15. Structured ASIC Technology. URL: www.faradaytech.com/html/products/structured-ASIC.html. (дата обращения: 20.02.2016).
16. *Ma K.K., Teifel J., Flores. R.S.* Sandia Rad-Hard, Fast-Turn Structured ASIC. The ViArray. URL: https://nepp.nasa.gov/respace_mapld11/talks/tue/MAPLD/1500%20-%20KKMa.pdf. (дата обращения: 20.02.2016).
17. ViArray. Trusted Rad-Hard Structured ASIC. URL: www.sandia.gov/mstc/documents/factsheets/ViArray_Fact_%20Sheet_SAND20113935P.pdf (дата обращения: 20.02.2016).
18. Triad Semiconductor. URL: www.triadsemi.com/services/productcatalog (дата обращения: 20.02.2016).

19. Via Configurable ASICs for Analog and Mixed Signal Applications. Triad Semiconductor. URL: www.triadsemi.com/2007/01/25/viaconfigurable-asics-for-analog-and-mixedsignal-applications (дата обращения: 20.02.2016).
20. SOI Analog/Mixed Signal ASICs for Radiation Hardened applications using Mixed Signal Via-Configurable Analog Arrays. Radiation Capability Responses to RFI #NNH09ZDA008L. Europa Jupiter System Mission Instrument Workshop. July 15–17. 2009. pp. 63–67.
21. Analog Master Slice. URL: <http://www.njr.com/semicon/analogmasterslice/-develop.html> (дата обращения: 20.02.2016).
22. Specific components SGA. URL: <http://www.sga.se> (дата обращения: 20.02.2016).
23. *Biolek D., Senani R., Biolkova V., Kolka Z.* Active Elements for Analog Signal Processing: Classification, Review, and New Proposals // *Radioengineering*. 2008. vol. 17. no. 4. pp. 15–32.
24. *Дворников О.В., Чеховский В.А., Дятлов В.Л., Богатырев Ю.В., Ластовский С.Б.* Изменение параметров комплементарных биполярных транзисторов при воздействии ионизирующих излучений // *Вопросы атомной науки и техники “ВАНТ”*. 2015. С. 17–22.
25. *Дворников О., Чеховский В., Дятлов В., Прокопенко Н.* Модуль на малошумящих полевых транзисторах для обработки сигналов лавинных фотодиодов // *Современная электроника*. 2014. № 8. С. 82–87.
26. *Дворников О., Чеховский В., Дятлов В., Прокопенко Н.* Применение структурных кристаллов для создания интерфейсов датчиков // *Современная электроника*. 2014. № 1. С. 32–37.
27. *Дворников О., Чеховский В., Дятлов В., Прокопенко Н.* Интерфейсы датчиков для систем на кристалле // *Современная электроника*. 2013. № 8. С. 40–47.
28. *Дворников О., Чеховский В., Дятлов В., Прокопенко Н.* Особенности аналоговых интерфейсов датчиков. Часть 1 // *Современная электроника*. 2013. № 2. С. 44–49.

References

1. Dvornikov O., Chehovskij V., Djatlov V., Prokopenko N. [Features analog sensor interfaces. Part 2]. *Sovremennaja jelektronika – Modern electronics*. 2013. no 3. pp. 58–63. (In Russ.).
2. Abramov I.I., Dvornikov O.V. *Proektirovanie analogovyh mikroschem dlja precizionnyh izmeritel'nyh sistem* [Designing analog chips for precision measuring systems]. Minsk Academy of Management at the President of the Republic Belarus. 2006. 286 с. (In Russ.).
3. Prokopenko N.N., Dvornikov O.V., Krutchinsky S.G. *Jelementnaja baza radiacionno-stojkikh informacionno-izmeritel'nyh sistem* [Element base radiation-resistant information and measuring systems]. Shakhty. 2011. 208 p. (In Russ.).
4. Analog Master Slice Service. Available at: <http://www.semicon.panasonic.co.jp/en/products/analog-master-slice/> (accessed 20.02.2016).
5. Semicustom QuickChip ASICs Implement RF Functions to 9GHz. Available at: <https://www.maximintegrated.com/en/app-notes/index.mvp/id/646> (accessed 20.02.2016).
6. Analog ASICs. Available at: <http://www.datasheetarchive.com/dl/Datasheet-054/DSA0018514.pdf> (accessed 20.02.2016).
7. Baturitsky M.A., Dvornikov O.V., Tchekhovskiy V.A. An analog bipolar-JFET master slice array for front-end electronics design. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*. 2003. vol. 498. no 1. pp. 443–452.
8. Dvornikov O.V., Chehovskij V.A., Djatlov V.L., Bogatyrev Ju.V., Lastovskij S.B. [Effect of fast electrons in the analog integrated circuit and elements]. *Voprosy atomnoj nauki i tehnik. Serija: fizika radiacionnogo vozdejstviya na radiojelektronnuju apparaturu - Issues of atomic science and technology. Series: Physics of radiation effects on electronic equipment*. 2012. vol. 3. pp. 54–59. (In Russ.).

9. Dvornikov O.V., Chehovskij V.A., Djatlov V.L., Bogatyrev Ju.V., Lastovskij S.B. [Radiation-resistant analog integrated circuits]. *Problemy razrabotki perspektivnyh mikro- i nanoelektronnyh sistem*. [Problems of development of advanced micro- and nanoelectronic systems.]. M.: IPPM RAN. 2012. pp. 280–283.
10. Dvornikov O.V., Tchekhovskij V.A., Dziaulau V.L., Prokopenko N.N. Influence of Ionizing Radiation on the Parameters of an Operational Amplifier Based on Complementary Bipolar Transistors. *Russian Microelectronics*. 2016. vol. 45. no. 1. pp. 54–62.
11. Baturitsky M.A., Dvornikov O.V., Reutovich S.I., Solomashenko N.F. Multichannel monolithic frontend system design. Part 2. Microwave bipolar-JFET process for low-noise charge-sensitive preamplifiers. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*. 1996. vol. 378. no. 3. pp. 570–576.
12. Clein D. CMOS IC layout: concepts, methodologies, and tools. Newnes. 1999. 281 p.
13. Structured ASIC. Available at: www.gigoptix.com/products/39-structuredasic. (accessed 20.02.2016).
14. ON Semiconductor Delivers Structured ASIC Technology for Military and Aerospace SoCs and FPGA8to8ASIC Conversions. Available at: www.onsemi.com/PowerSolutions/newsItem.do?article=1734. (accessed 20.02.2016).
15. Structured ASIC Technology. Available at: www.faradaytech.com/html/products/structuredASIC.html. (accessed 20.02.2016).
16. Ma K.K., Teifel J., Flores R.S. Sandia Rad-Hard, Fast-Turn Structured ASIC. The ViArray. Available at: www.nepp.nasa.gov/respace_mapld11/talks/tue/MAPLD/1500%20-%20KKMa.pdf. (accessed 20.02.2016).
17. ViArray. Trusted Rad-Hard Structured ASIC. Available at: www.sandia.gov/mstc/documents/factsheets/ViArray_Fact_%20Sheet_SAND20113935_P.pdf. (accessed 20.02.2016).
18. Triad Semiconductor. Available at: www.triadsemi.com/services/productcatalog. (accessed 20.02.2016).
19. Via Configurable ASICs for Analog and Mixed Signal Applications. Triad Semiconductor. Available at: www.triadsemi.com/2007/01/25/viaconfigurable-asics-for-analog-and-mixedsignal-applications. (accessed 20.02.2016).
20. SOI Analog/Mixed Signal ASICs for Radiation Hardened applications using Mixed Signal Via-Configurable Analog Arrays. Radiation Capability Responses to RFI #NNH09ZDA008L. Europa Jupiter System Mission Instrument Workshop. July 15–17. 2009. pp. 63–67.
21. Analog Master Slice. Available at: <http://www.njr.com/semicon/analogmasterslice/develop.html>. (accessed 20.02.2016).
22. Specific components SGA. Available at: <http://www.sga.se> (accessed 20.02.2016).
23. Biolek D., Senani R., Biolkova V., Kolka Z. Active Elements for Analog Signal Processing: Classification, Review, and New Proposals. *Radioengineering*. 2008. vol. 17. no. 4. pp. 15–32.
24. Dvornikov O.V., Chehovskij V.A., Djatlov V.L., Bogatyrev Ju.V., Lastovskij S.B. [Changing the complementary bipolar transistors when exposed to ionizing radiation]. *Voprosy atomnoj nauki i tehniki "VANT" – Problems of Atomic Science and Technology "PAST"*. 2015. pp. 17–22. (In Russ.).
25. Dvornikov O., Chehovskij V., Djatlov V., Prokopenko N. [Module for low-noise FET for signal processing avalanche photodiodes]. *Sovremennaja elektronika – Modern electronics*. 2014. no. 8. pp. 82–87. (In Russ.).
26. Dvornikov O., Chehovskij V., Djatlov V., Prokopenko N. [The use of structural crystals to create a sensor interface]. *Sovremennaja elektronika – Modern electronics*. 2014. no. 1. pp. 32–37. (In Russ.).
27. Dvornikov O., Chehovskij V., Djatlov V., Prokopenko N. [Sensor interfaces for systems on a chip]. *Sovremennaja elektronika – Modern electronics*. 2013. no. 8, pp. 40–47. (In Russ.).

28. Dvornikov O., Chehovskij V., Djatlov V., Prokopenko N. [Features analog sensor interfaces. Part 1]. *Sovremennaja jelektronika – Modern electronics*. 2013. no. 2. pp. 44-49. (In Russ.).

Дворников Олег Владимирович — д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник, ОАО «Минский научно-исследовательский приборостроительный институт» (МНИПИ). Область научных интересов: аналоговые микросхемы, аналоговая микроэлектроника, радиационная стойкость, интерфейсы, биполярно-полевые технологии, усилители, преобразователи сигналов, источники опорного напряжения, PSpice модели. Число научных публикаций — 300. oleg_dvornikov@tut.by; ул. Я. Коласа, 73, Минск, 220113, Беларусь; р.т.: +375296164587.

Dvornikov Oleg Vladimirovich — Ph.D., Dr. Sci., professor, senior researcher, Plc. «Minsk research instrument- making institute» (MNIPI). Research interests: analog ICs, analog microelectronics, radiation resistance, interfaces, bipolar and field-effect technologies, amplifiers, signal converters, voltage references, PSpice models. The number of publications — 300. oleg_dvornikov@tut.by; 73, Kolasa st., Minsk, 220113, Belarus; office phone: +375296164587.

Прокопенко Николай Николаевич — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой информационных систем и радиотехники, Донской государственной технической университет (ДГТУ). Область научных интересов: аналоговая микроэлектроника, аналого-цифровая схемотехника. Число научных публикаций — 599. prokopenko@sssu.ru; ул. Шевченко, 147, Шахты, 346500; р.т.: 8(8636) 226050, Факс: 8(8636) 226050.

Prokopenko Nikolay Nikolayevich — Ph.D., Dr. Sci., professor, head of the information systems and radio engineering department, Don State Technical University (DSTU). Research interests: analog microelectronics, analog-to-digital circuitry. The number of publications — 599. prokopenko@sssu.ru; 147, Shevchenko st., Shakhty, 346500, Russia; office phone: 8(8636) 226050, Fax: 8(8636) 226050.

Бутырлагин Николай Владимирович — аспирант кафедры информационных систем и радиотехники, Донской государственной технической университет (ДГТУ). Область научных интересов: аналоговая микроэлектроника, аналого-цифровая схемотехника. Число научных публикаций — 100. nbutyrlagin@mail.ru; ул. Шевченко, 147, Шахты, 346500; р.т.: +79034320799.

Butyrlagin Nikolay Vladimirovich — PhD student of the information systems and radio engineering department, Don State Technical University (DSTU). Research interests: analog microelectronics, analog-to-digital circuitry. The number of publications — 100. nbutyrlagin@mail.ru; 147, Shevchenko st., Shakhty, 346500, Russia; office phone: +79034320799.

Бугакова Анна Витальевна — магистрант кафедры информационных систем и радиотехники, Донской государственной технической университет (ДГТУ). Область научных интересов: аналоговая микроэлектроника, аналого-цифровая схемотехника. Число научных публикаций — 50. annabugakova.1992@mail.ru; ул. Шевченко, 147, Шахты, 346500; р.т.: +79094169380.

Bugakova Anna Vitalievna — master student of the information systems and radio engineering department, Don State Technical University (DSTU). Research interests: analog microelectronics, analog-to-digital circuitry. The number of publications — 50. annabugakova.1992@mail.ru; 147, Shevchenko st., Shakhty, 346500, Russia; office phone: +79094169380.

Поддержка исследований. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 16-19-00122).

Acknowledgements. The article was prepared within the framework of the project 16-19-00122 of the Russian Science Foundation for 2016-2018.

РЕФЕРАТ

Дворников О.В., Прокопенко Н.Н., Бутырлагин Н.В., Бугакова А.В.
Перспективы применения новых микросхем базового матричного и базового структурного кристаллов в датчиковых системах.

Целью настоящей статьи является рассмотрение особенностей существующих микросхем базового матричного (БМК) и базового структурного (БСК) кристаллов, предназначенных для проектирования аналоговых интерфейсов.

Приведены краткие сведения об интегральных схемах (ИС) БМК и БСК отечественного и иностранного производства, ориентированных на применение в датчиковых системах, в том числе роботов различного назначения и летательных аппаратах.

Рассмотрены структуры новых (2016 г.) микросхем БМК (АБМК-2.1) и БСК (МН2ХА010), а также перспективы проектирования на их основе радиационно-стойких ИС для аналоговой обработки сигналов и интерфейсов датчиков различной физической природы.

Микросхема БСК МН2ХА010 предназначена, прежде всего, для создания многоканальных (до восьми каналов) специализированных аналоговых интерфейсов датчиков. Это обеспечивается за счет формирования межсоединений имеющихся в ее структуре IP модулей, которое может быть выполнено профильными предприятиями.

Преимуществом элементной базы БМК и БСК является малое радиационное изменение граничной частоты f_T , одинаковое изменение коэффициента усиления тока базы и напряжения база-эмиттер n-p-n- и p-n-p-транзисторов при воздействии флюенса электронов $FE = 3 \cdot 10^{14}$ эл/см² с энергией 4 МэВ и поглощенной дозе $DG = 3$ Мрад гамма-излучения ⁶⁰Со, обеспечивающее разработку аналоговых ИС, малочувствительных к воздействию ионизирующего излучения.

Наличие в БСК МН2ХА010 достаточно большого количества заранее сформированных активных компонентов может стать основой для проектирования радиационно-стойких аналоговых процессоров и преобразователей сигналов различного назначения, в том числе IP-модулей мостовых измерительных схем, преобразователей сигналов кремниевых фотодиодов и многоэлементных фотоприемников, пьезо- и биосенсоров, дифференциальных преобразователей емкости, операционных, мультидифференциальных и инструментальных усилителей основных модификаций, малощумящих и зарядо-чувствительных усилителей, RC-фильтров, приемников дифференциальных линий связи, многоканальных активных сумматоров потенциальных сигналов, пьезоэлектрических датчиков ускорения, управляемых усилителей, амплитудных детекторов, усилителей мощности с аддитивной коррекцией нелинейных искажений, дифференциальных и мультидифференциальных усилителей токов, прецизионных источников опорного напряжения, логических элементов с токовым преобразованием сигналов, схем подавления шумов в стабилизаторах напряжения, аналоговых ключей, компараторов АЦП и т.д.

SUMMARY

Dvornikov O.V., Prokopenko N.N., Butyrlagin N.V., Bugakova A.V.
Perspectives of Application of New Chips of Analog Master Slice Array and Configurable Structured Array of Crystals in the Sensor Systems.

The purpose of this article is to examine the features of the existing chip of analog master slice array (MSA) and configurable structured array (CSA) crystals, intended for the design of analog interfaces.

Summary information on existing integrated circuits (IC) analog master slice array (MSA) and configurable structured array (CSA) crystals of domestic and foreign production-oriented applications in sensor systems, including robots for various purposes, and aircraft are reduced.

The structures of the new (2016) integrated circuits MSA (AGAMC-2.1) and CSA (MH2XA010), as well as the prospects of designing on their basis of radiation-resistant IC for analog signal processing and interfaces of sensors of different physical kind are considered.

Chip MH2XA010 is designed primarily to create multi-channel (up to eight channels) specialized analog interfaces of sensors. This is achieved through the formation of interconnect elements available in its structure IP modules, that can be performed by specialized companies.

The advantage of element base MSA and CSA radiation is small change in the cutoff frequency f_{cutoff} , the same gain change of the base current and voltage, the base-emitter n-p-n and p-n-p transistors when exposed to a fluence of electrons $FE = 3 \cdot 10^{14} \text{ e/cm}^2$ with an energy of 4 MeV and absorbed dose $DG = 3 \text{ Mrad}$ of gamma radiation ^{60}Co , ensuring the development of analog IP, which is insensitive to ionizing radiation.

The presence in CSA MH2XA010 rather large number of pre-formed active components can be the basis for designing radiation hardened analog processors and signal transducers for various purposes, including IP modules of bridge measuring circuits, signal converters, silicon photodiodes and multi-element photodetectors, piezo- and biosensors, transducers differential capacitance, operating, and differential difference instrumentation amplifiers the main modifications, and low-noise charge-sensitive amplifiers, RC filters, differential line receivers, multi-active potential of adders signals of the piezoelectric sensors for acceleration, managed amplifiers, amplitude detectors, power amplifier with additive correction linear distortion, differential and differential difference amplifier currents, precision voltage references, logic elements with the current transformation signals, charts suppress the noise in the voltage regulators, analog switches, comparators ADC, etc.

Н.Н. ПРОКОПЕНКО, Н.И. ЧЕРНОВ, В. ЮГАЙ
**СИНТЕЗ К-ЗНАЧНЫХ ЦИФРОВЫХ IP-МОДУЛЕЙ ДЛЯ
РОБОТОВ И ДАТЧИКОВЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ
ЛИНЕЙНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ ТОКОВЫХ ЛОГИЧЕСКИХ
СИГНАЛОВ**

Прокопенко Н.Н., Чернов Н.И., Югай В. Синтез к-значных цифровых IP-модулей для роботов и датчиковых систем на основе линейных преобразований токовых логических сигналов.

Аннотация. Приведены результаты исследования двузначной и многозначной элементной базы (ЭБ) для цифровых структур, в т.ч. роботов и летательных аппаратов, функционирующей на основе линейных преобразований токовых логических сигналов. Цель исследований — разработка методов синтеза и аналоговых схмотехнических решений альтернативной цифровой ЭБ с улучшенными (в сравнении с традиционной элементной базой) техническими, технологическими и эксплуатационными характеристиками.

Ключевые слова: булева алгебра, линейная алгебра, двузначная логика, многозначная логика, линейное пространство, логический синтез, элементная база, к-значные логические элементы.

Prokopenko N.N., Chernov N.I., Yugay V.Y. **Synthesis of k-valued Digital IP-Modules for Robots and Sensor Systems Based on Linear Transformations of Current Logic Signals.**

Abstract. The paper presents the results of studies of a double-valued and a multi-valued elements stock (ES) for digital structures, including robots and flying vehicles, that operates by using linear transformations of current logic signals. A goal of the studies is to develop methods of synthesis and analog circuits engineering solutions of the alternative digital ES with the improved (as compared to the traditional elements stock) technical, technological and operational characteristics.

Keywords: Boolean algebra; linear algebra; double-valued logic; multi-valued logic; linear space; logic synthesis; elements stock; k-valued logic elements.

1. Введение. Условия работы электронных компонентов целого ряда современных технических устройств характеризуются наличием большого количества дестабилизирующих факторов: электрических помех, ионизирующих излучений, температуры и т.д. [1]. К подобным компонентам следует отнести электронную аппаратуру искусственных спутников Земли и космических аппаратов, атомных электростанций, манипуляторов технологических линий, роботов, выполняющих восстановление разрушенных объектов с повышенным уровнем радиоактивности, а также боевых роботов в реальных условиях их применения. Чтобы обеспечить надежное функционирование электронной аппаратуры применяются специальные меры ее защиты от внешних дестабилизирующих воздействий: радиационно-стойкая элементная база, различные виды экранирования, специфичные

конструкции и т.д. Это увеличивает время и повышает стоимость разработки, осложняет ее диагностику и контроль.

В ряде случаев при построении специализированных систем автоматического управления (САУ) приходится обрабатывать не потенциальные, а токовые сигналы многоканальных датчиков, обеспечивать логическое преобразование входных токовых координат, например, компараторов на основе классических дифференциальных каскадов в параллельных АЦП. Некоторые исполнительные элементы САУ также требуют многоуровневого и многозначного токового управления. В этой связи уместно поставить вопрос о применении для задач данного класса однозначных и многозначных цифровых устройств с входными и выходными токовыми логическими переменными.

Одним из перспективных направлений улучшения характеристик ЭК является разработка таких методов их построения, при которых цифровые IP-модули предлагаемого подкласса обладают потенциально более высокими параметрами, учитывающими воздействие указанных выше дестабилизирующих факторов. Такой подход требует разработки иных, отличных от существующих, методов логического синтеза, а также структурных и схемотехнических решений.

Целью настоящей работы является изложение результатов исследования возможности создания микроэлектронной цифровой элементной базы на отличной от булевой, математической основе. Предложен альтернативный математический аппарат, методы синтеза, рассмотрены примеры логического синтеза и схемотехнического проектирования новой цифровой элементной базы различной значности, реализуемой на основе принципов аналоговой схемотехники.

2. Булева алгебра как аппарат логического синтеза. Первой логико-алгебраической системой, использованной для решения задач логического синтеза электронных и микроэлектронных логических схем, стала булева алгебра. Роль ее в разработке цифровых структур различного назначения переоценить невозможно: проектирование всех цифровых структур автоматики, вычислительной техники, систем управления, связи и т.д. произведено методами, в основе которых в качестве математического аппарата была использована булева алгебра.

Однако следует отметить, что булева логика первоначально была разработана как математический аппарат логического синтеза релейно-контактных схем, а потом приспособлена для нужд электроники. Последнее обстоятельство, вероятно, предопределило особенности применения булевой логики при проектировании БИС. Причиной таких особенностей стали такие ее свойства, как переборность решения задач минимизации булевых функций, кодирования состояний автомата, доопределения частичных булевых

функций и др. Следствием этих особенностей были предпринятые в разное время попытки «сместить» булеву логику с позиций наиболее подходящего для целей логического синтеза математического аппарата. Одной из таких попыток стала разработка спектральных методов, слабо зависящих от конкретных особенностей базисной системы элементов, приспособленных к синтезу цифровых структур на интегральных схемах, а также схемах с переменной структурой и схемах, адаптирующихся к изменениям среды, в которой они функционируют [3]. Еще одним привлекательным свойством спектрального подхода явилась пригодность его для синтеза схем, построенных на элементах с различным числом устойчивых состояний и цифроаналоговых схем.

По оценке самих разработчиков этого подхода основным недостатком спектральных методов является их приближенность, т. е. не абсолютная минимальность получаемых схемных решений. Кроме того, спектральные методы синтеза решали задачу проектирования цифровых структур на существующей элементной базе, т.е. не подменяли булеву логику на уровне проектирования ИС.

В качестве исходной установки по улучшению технических характеристик БИС авторами настоящей работы принято предположение о том, что такое улучшение должно быть результатом по крайней мере двух воздействий [4]:

— технологического (уменьшение габаритов элементов, повышение плотности размещения, применение новых материалов, совершенствование технологических процессов и т.д.);

— математического (разработка и использование иных, в том числе и не булевых, функциональных базисов и логических операций, имеющих упрощенную, по сравнению с булевой, аппаратную интерпретацию, разработка новых методов логического синтеза и т.д.).

Что касается технологии, то она находилась и продолжает находиться в постоянном развитии и именно ей мы обязаны успехами улучшения технических характеристик БИС. Особенности же булевой логики привели к тому, что ее математическая составляющая практически сохранилась в неизменном виде с момента ее создания и не оказала какого-либо существенного влияния на характеристики БИС (кроме, может быть, методов минимизации).

Поскольку мы намерены уделить основное внимание именно этой составляющей, то рассмотрим ее несколько подробнее. Особенности булевой алгебры как математического аппарата логического синтеза характеризуется рядом ограничений [5, 6]:

— математических — неадекватностью вербального (исходного) и алгебраического (конечного) описаний логической функции, реализуемой схемой (логическая функция сумматора не содержит

операции суммирования). Это требует дополнительных аппаратных и временных затрат на реализацию функций;

— технологических — использованием ограниченного количества функционально полных систем логических функций для построения схем (2 из 17 возможных). Это оставляет открытым вопрос об оптимальности используемых схемотехнических решений для построения конкретных логических схем;

— конструкторских — рост сложности схем вызывает технологические проблемы размещения все усложняющихся элементов и особенно проводников на ограниченной площади кристалла. Это требует постоянного уменьшения их размеров вплоть до величин, при которых перестают действовать физические законы их функционирования. Нанотехнологии, возможно, смогут увеличить быстродействие, но не смогут уменьшить размеры и плотность размещения элементов;

— эксплуатационных — потенциальный характер логических сигналов в БИС («нуль», «единица») определяет повышенный уровень внутренних помех и снижает помехоустойчивость БИС. Это определяет надежность функционирования БИС в составе сложных цифровых систем;

— энергетических — большое количество проводников в ограниченном объеме кристалла порождает соответствующее количество паразитных емкостных связей между ними, постоянный перезаряд которых требует непроизводительных энергетических затрат. Это снижает уровень полезного использования потребляемой мощности до 30-40%. Кроме того, возможности повышения плотности размещения элементов «упираются» в проблему теплоотвода.

Преодоление указанных ограничений возможно по крайней мере двумя путями:

— разработкой и использованием новых перспективных технологий — квантовых, молекулярных и т.д.;

— использованием многозначной элементной базы и многозначных IP-модулей для средств автоматики, вычислительной техники и систем управления и т.д.

Главный ограничительный фактор первого пути — его временная и материальная затратность: для достижения уровня инженерных решений необходимы еще более объемные исследования, создание технологий, оборудования, средств измерения и т.д. Вероятность достижения обещанных показателей пока не абсолютна. Первый путь — это, скорее, путь развития суперкомпьютеров. Вряд ли можно представить себе использование подобных технологий, например, в мобильной аппаратуре.

Второй путь — гораздо менее затратный: существующие материалы и технологии, оборудование, средства измерения могут быть использованы без каких-либо изменений.

Следует отметить, что развитию второго пути препятствует сама булева алгебра. Математический переход к многозначной булевой логике требует аналогичного перехода в средствах реализации многозначных цифровых устройств: требуются физические элементы с числом различных состояний, равным значности логики [7, 8]. Для двузначной логики это требование является легко выполнимым: естественных материалов и искусственных устройств с двумя различными состояниями достаточно много (реле, электронные лампы, полупроводники и т.д.). У многозначной логики ситуация иная: природных устройств с числом различных состояний больше двух не существует. Что же касается искусственных многозначных логических элементов, способных заменить природные, то они, несмотря на многочисленные попытки, пока не разработаны. Тем не менее исследования в области многозначной логики продолжаются, в том числе и на мировом уровне. Свидетельством тому являются ежегодные симпозиумы по многозначной логике под эгидой IEEE [9, 10]. Однако анализ публикаций последних лет даже этого мирового форума показывает, что основные направления исследований в области многозначной логики не связаны с созданием соответствующей элементной базы и многозначных средств обработки информации.

Авторами настоящей работы развивается иной, отличный от булева, подход к логическому синтезу и схемотехническому проектированию цифровых структур различной значности, основанный на замене части логических операций арифметическими. В сочетании с возникающими в этом случае особенностями представления реализуемых функций и методологии логического синтеза этот подход позволяет получать оригинальные [11-19] схемотехнические решения как двузначных, так и многозначных цифровых структур, в том числе IP-модулей и спецвычислителей для датчиковых систем роботов.

3. Базовая концепция линейного логического синтеза.

Необходимость развития математической составляющей воздействия на технические характеристики БИС предполагает, прежде всего, выделение «критических точек» БИС, улучшение ситуации в которых возможно математическими средствами. В их числе можно выделить следующие проблемы:

- непроизводительные затраты оборудования на выполнение промежуточных преобразований исходных данных решаемой задачи;
- рост числа межсоединений в кристалле БИС;
- создание в одном кристалле аналоговых и цифровых элементов БИС.

Первая проблема состоит в том, что логические элементы (других элементов в БИС нет) используются для реализации не только логических операций, но и операций, не являющихся таковыми с точки зрения дискретной математики: сложение, сдвиг, сумма по модулю, нахождение меньшего из чисел и т.д. Для этого синтезированы логические функции и реализованы цифровые схемы, адекватно моделирующие соответствующие «нелогические» операции. При этом в процессе решения прикладной задачи выполняется тройное преобразование: переход от численного представления данных исходной задачи к логическому (АЦП), выполнение операций средствами логики и интерпретация логического результата соответствующими числовыми значениями (ЦАП). Возможным путем упрощения ее решения является использование такого математического аппарата синтеза элементов БИС, который требовал бы минимального преобразования исходного представления задачи для получения ее решения (выполняемая функция записывается в том виде, в котором она будет реализована).

Суть второй проблемы состоит в том, что рост сложности БИС сопровождается снижением эффективности использования площади кристалла (до 75% ее занимают межсоединения), ухудшением энергетических показателей БИС (до 80% энергии затрачивается на перезаряд емкостей линий связи), частотных свойств и т.д. Возможным путем ее решения является использование математического аппарата логического синтеза, обеспечивающего уменьшение количества элементов и преимущественным использованием монтажных логических операций.

Наличие третьей проблемы определяется современной тенденцией создания «систем-на-кристалле» (СнК) и различием требований к техническим характеристикам аналоговых и цифровых IP-модулей. Возможным путем ее решения является выполнение цифровых элементов БИС на принципах аналоговой элементной базы и изготовление СнК в едином технологическом цикле.

Возможные средства решения этих проблем перечислены ниже:

— токовое представление сигналов (для уменьшения внутренних помех, количественного представления логических значений);

— использование арифметических операций (для уменьшения объема дополнительных преобразований, аппаратных затрат и числа линий связи);

— перенесение значности из схемы в сигнал (для ликвидации проблемы создания многозначных структур на двузначных элементах и замены ключевой схмотехники линейной схмотехникой).

Перечисленные факторы являются исходными положениями базовой концепции линейного синтеза k-значных цифровых

структур [4, 5]. Из нее следует, что соответствующая ей алгебраическая структура должна:

- использовать арифметические операции, в первую очередь, сложение, вычитание и умножение на постоянный коэффициент, и некоторые другие;

- иметь большую свободу выбора логических операций, а следовательно, исходных схмотехнических решений компонентов БИС, чем булева алгебра;

- использовать в качестве средства для своей реализации линейную аналоговую схмотехнику.

В качестве математического аппарата для реализации этой концепции была выбрана линейная алгебра [6]. Аргументами в пользу такого выбора являются:

- возможность использовать для формирования базисов иных операций, отличных от операций линейного пространства;

- использование арифметических операций, не зависящих от значности;

- минимум непроектируемых преобразований и, следовательно, минимальная избыточность схмотехнических решений;

4. Линейная алгебра как математический аппарат логического синтеза. Система $A \rightarrow \langle A; +, \cdot, \theta; P \rangle$, где $P \rightarrow \langle P; +, \cdot, 0, 1 \rangle$ — поле, θ — нулевой вектор, $A \rightarrow \langle A; +, \cdot, \theta; P \rangle$ — векторное (линейное) пространство над полем P , называется линейной алгеброй над полем.

Линейное пространство. Интерпретируя эту алгебраическую систему определенным образом, можно получать алгебры с различными свойствами. Например, интерпретируя A как множество термов булевых функций $f(x_1, \dots, x_n)$, операции «+» и «-» как $\max(x_1, \dots, x_n)$, $\min(x_1, \dots, x_n)$, получаем алгебру $A \rightarrow \langle A; \max, \min, \theta; P \rangle$. Точно также, оставив семантику операций в первоначальном виде (т.е. определив их как обычные арифметические операции), можно рассматривать приведенную систему как линейную алгебру на множестве A векторов линейного пространства. В этом случае множество k -значных логических функций совпадает с множеством векторов k -мерного линейного пространства, а множество термов, необходимых для представления функций представляет собой некоторый базис линейного пространства, образование векторов которого может производиться с использованием любых математических операций.

Базовым множеством этой структуры является множество векторов линейного пространства соответствующей размерности. При этом множество булевых векторов является подмножеством пространства векторов линейного пространства.

Столь гибкая структура обеспечивает:

- возможность создания самых различных базисов и представлений логических функций на их основе;
- формирование значений k -значных переменных суммированием значений двузначных переменных, т.е. формированием многозначных функциональных элементов из двузначных функциональных элементов;
- использование арифметических операций при соответствующем выборе физического представления сигнала (например, в виде квантов тока) дает возможность реализовать некоторые из них монтажно, т.е. без использования функциональных элементов, уменьшая тем самым аппаратные затраты.

Поскольку структура представления k -значных логических функций (т.е. будущей схмотехнической реализации) в линейных пространствах не зависит от значности, представляется целесообразным перенесение значность логики в сигнал. При этом схмотехническая реализация будет иметь вид линейной аналоговой схемы, значность преобразования сигнала в которой будет определяться значностью сигнала. В сочетании со способом получения многозначных сигналов в виде алгебраической суммы двузначных предлагаемый подход к синтезу k -значных логических функций выглядит вполне логичным и законченным. Для схмотехнической реализации k -значных логических функций вполне пригодны двузначные функциональные элементы.

Логическое проектирование цифровых структур в линейной алгебре совпадает с представлением векторов в линейных пространствах и включает в себя операции:

- формирование базиса линейного пространства;
- представление вектора реализуемой логической функции в данном базисе.

Для формирования базисов из логических переменных можно построить различные конструкции линейно независимых векторов с заданными свойствами. В качестве примера на рисунке 1 приведены базисная и обратная матрицы одного из возможных двузначных базисов для функций двух аргументов (базис Жегалкина).

$$A = \begin{bmatrix} 1 \\ x_1 \\ x_2 \\ | x_1 - x_2 | \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}, A^{-1} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 & -1 \\ 0 & -1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & -1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & -1 \end{bmatrix}$$

Рис. 1. Базисная и обратная матрицы двузначного базиса двух аргументов

Элемент $|x_1 - x_2|$ базисной матрицы представляет собой арифметическую интерпретацию булевой операции $x_1 \oplus x_2$.

Аналогичный трехзначный базис двух аргументов представлен на рисунке 2.

$$J = \begin{bmatrix} 1 \\ x_1 \\ x_2 \\ |1 - x_1| \\ |1 - x_2| \\ |x_1 - x_2| \\ |x_1 - |1 - x_2|| \\ |x_2 - |1 - x_1|| \\ ||x_1 - |x_1 - x_2|| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 2 & 2 & 2 \\ 0 & 1 & 2 & 0 & 1 & 2 & 0 & 1 & 2 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 2 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 2 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 2 & 2 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 2 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 2 \end{bmatrix}$$

Рис. 2. Базисная и обратная матрицы трехзначного базиса двух аргументов

Представление логической функции в данном базисе производится путем умножения вектора-строки значений функции на столбцы обратной базисной матрицы. При этом получается вектор коэффициентов разложения исходного представления логической функции по данному базису. Умножая коэффициенты этого вектора на базисные векторы, получаем представление логической функции в данном базисе. Например, представление конъюнкции двух аргументов в базисах, приведенных на рисунках 1 и 2 имеет вид

$$x_1 \& x_2 = \frac{x_1 + x_2 - |x_1 - x_2|}{2}$$

как для двузначных, так и для трехзначных аргументов.

Аффинное пространство. Использование представления логических функций в аффинных пространствах приводит к линейной интерпретации их порогового представления. Например, операции основной функционально полной системы представляются в аффинном пространстве предикатами

$$\begin{aligned} x_1 \& x_2 &= P((x_1 + x_2) > 1), \\ x_1 \vee x_2 &= P((x_1 + x_2) > 0), \\ \bar{x} &= P(1 > x). \end{aligned}$$

Логические условия, представленные в скобках предикатов, могут быть реализованы вычитанием (усеченной разностью), например:

$$\begin{aligned} x_1 \& x_2 &= (x_1 + x_2) \div 1 = 1 \div [2 \div (x_1 + x_2)]; \\ x_1 \vee x_2 &= 1 \div [1 \div (x_1 + x_2)]. \end{aligned}$$

5. Линейная схемотехника и ее особенности.
Схемотехническая реализация функциональных компонентов

линейных цифровых структур предполагает наличие библиотеки реализаций базовых операций, определяемых выбранным базисом. Выбрав в качестве основной операции базиса, например, операцию усеченной разности и проанализировав состав базисных векторов, можно получить набор таких реализаций, приведенный в таблице 1.

Таблица 1. Схемотехническая реализация линейных базовых операций

Структура	Схема
Инвертор знака	
Алгебраическая сумма (усеченная разность, элемент пороговый последовательный, повторитель)	
	$y_1 = x_0 - y_0$
	$-y_1 = x_0 - y_0$

Из таблицы следует, что основными функциональными структурами линейной схемотехники для данного базиса являются:

- токовое зеркало;
- сумматор токов (монтажное соединение токовых зеркал);
- токовый инвертор;
- последовательный дифференциальный каскад (элемент вычитания).

Из приведенного набора компонентов можно построить универсальный логический элемент (аналог булева инвертора), реализующий операцию усеченной разности и представляющий результат реализации в виде, удобном для дальнейшего использования. Принципиальная схема универсального логического элемента усеченной разности показана на рисунке 3.

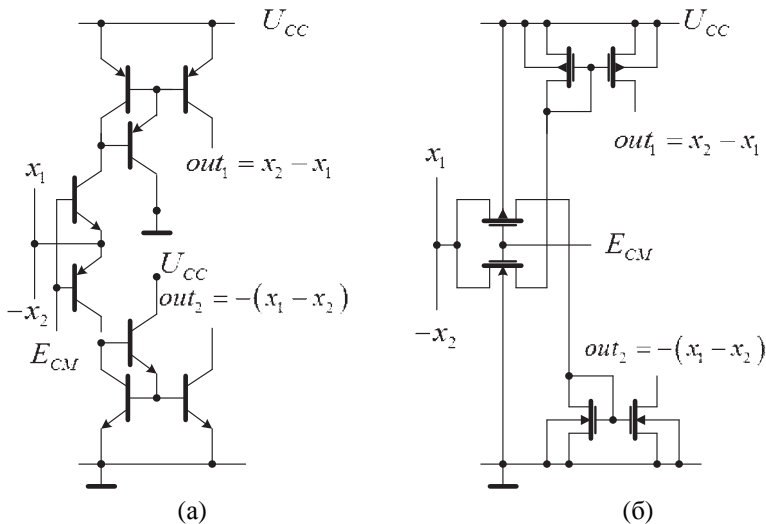


Рис. 3. Варианты построения элемента усеченной разности:
(а) биполярная схема, (б) КМОП-схема

На рисунке 3 символами x_1 и x_2 обозначены алгебраически складываемые кванты токов. Результат суммирования подается на объединенные эмиттеры (истоки) транзисторов. При $x_1 > x_2$ получаем $out_1 = 0$, а на выходе out_2 формируется инвертированная по направлению разность квантов входных токов. При $x_1 < x_2$ выходы out_1 и out_2 по уровням сигналов меняются местами. При отсутствии необходимости один из токовых инверторов также может быть удален из схемы.

На рисунке 4 показаны осциллограммы входных и выходных сигналов логического элемента усеченной разности (см. рисунок 3, а), полученные в среде Cadence на моделях техпроцесса компании Zarlink со следующими параметрами транзисторов: NPN – FT = 2 ÷ 8.5 ГГц, $U_{кэ0}$ = 6 В, $\beta \approx 160$ –175; PNP – FT = 2 ÷ 8.5 ГГц, $U_{кэ0}$ = 6 В, $\beta \approx 160$ –170.

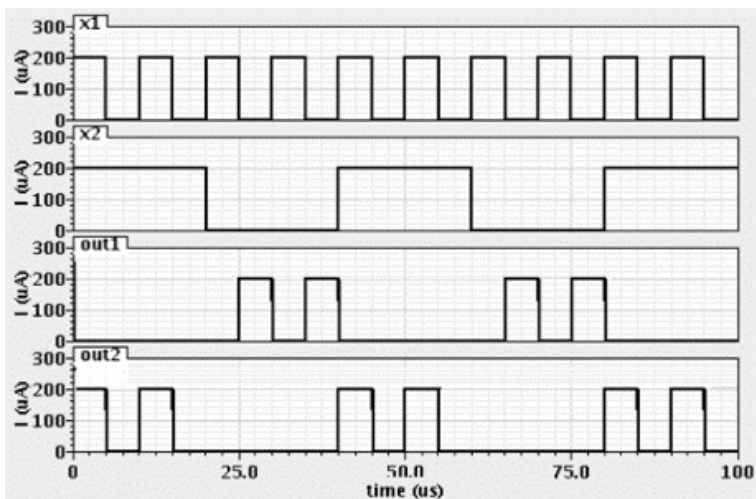


Рис. 4. Осциллограммы входных и выходных сигналов элемента усеченной разности, рисунок 3а

6. Заключение. Полученные результаты исследования позволяют считать линейный синтез k -значных логических элементов ($k = 2, 3, \dots$) одним из перспективных направлений логического синтеза спецвычислителей роботов, датчиковых систем и средств автоматики. Это связано с тем, что данный подход:

- снимает ограничения, накладываемые булевой алгеброй на процесс синтеза (например, отсутствие процедуры минимизации, необходимость наличия k -значных функциональных элементов);

- делает процесс логического синтеза независимым от значности;

- использует для синтеза цифровых структур аналоговые схемы, работающие в активном режиме, что увеличивает частотный диапазон работы элементов (задержки составляют десятки пикосекунд/элемент);

— обеспечивает возможность учета эксплуатационных характеристик будущих элементов еще на этапе логического синтеза (за счет выбора подходящего базиса);

— обеспечивает высокую технологичность изготовления логических элементов (схемы состоят только из транзисторов);

— обеспечивает минимизацию аппаратных затрат за счет применения монтажной реализации отдельных операций.

По материалам проведенных исследований получено 28 патентов на схемные решения k -значных логических элементов, более 10 заявок на патенты находятся в стадии экспертизы.

Литература

1. *Воротников С.А.* Информационные устройства робототехнических систем // М.: Изд-во МГТУ им. Баумана. 2005. 384 с.
2. Многозначные логики и их применения: Логики в системах искусственного интеллекта / Под ред. Финна В.К. // М.: УРСС. 2008. Т. 2. 240 с.
3. *Карповский М.Г., Москалев Э.С.* Спектральные методы анализа и синтеза дискретных устройств // М.: Энергия. 1973. 144 с.
4. *Чернов Н.И., Югай В.Я.* Неклассический синтез цифровых структур средствами аналоговой схемотехники // Труды IX Международного научно-практического семинара «Проблемы современной аналоговой схемотехники». 2012. с. 138–144.
5. *Chernov N.I., Yugaï V.Ya., Prokopenko N.N., Butyrлагin N.V.* Basic Concept of Linear Synthesis of Multi-Valued Digital Structures in Linear Spaces // Proceedings of IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2013). 2013. Pp. 146–149.
6. *Прокопенко Н.Н., Чернов Н.И., Югай В.Я.* Линейный логический синтез двужначных цифровых структур в линейных пространствах // Конгресс «IS&IT'13». «Интеллектуальные системы'13», «Интеллектуальные САПР-2013»: труды конференций. Т.1. Москва: Физматлит. 2013. С. 278–283.
7. *Lukasiewicz J.* Logika trojwartosciowa // Ruch Filozoficzny. 1920. vol. 5. no. 9. (In Polish).
8. *Post E.L.* Introduction to a General Theory of Elementary Propositions // Amer. Journ. of Math. 1921.vol. 43. no 3. pp. 163–185.
9. *Stankovic M., Stojkovic S., Stankovic R.S.* Representation of Incompletely Specified Binary and Multiple-Valued Logic Functions by Compact Decision Diagrams // IEEE 42nd International Symposium on Multiple-Valued Logic. 2012. pp. 142–147.
10. *Nagayama S., Sasao T., Butler J.T.* Analysis of Multi-state Systems with Multi-state Components Using EVMDDs // IEEE 42nd International Symposium on Multiple-Valued Logic. 2012. pp. 122–127.
11. *Дворников О.В., Прокопенко Н.Н., Чернов В.И., Югай В.Я.* Одноразрядный полный сумматор с многозначным внутренним представлением сигналов // Патент России № 2504074. 2014.
12. *Чернов Н.И., Югай В.Я., Прокопенко Н.Н., Дворников О.В.* Мажоритарный элемент с многозначным внутренним представлением сигналов // Патент России № 2506696. 2014.
13. *Чернов Н.И., Прокопенко Н.Н., Югай В.Я., Дворников О.В.* Логический элемент «Исключающее ИЛИ» с многозначным внутренним представлением сигналов // Патент России № 2506695. 2014.

14. Прокопенко Н.Н., Чернов Н.И., Югай В.Я. Логический элемент «И» с многозначным внутренним представлением сигналов // Патент России № 2509412. 2014.
15. Прокопенко Н.Н., Чернов Н.И., Дворников О.В., Югай В.Я. Логический элемент «И» с многозначным внутренним представлением сигналов // Патент России № 2509413. 2014.
16. Прокопенко Н.Н., Чернов Н.И., Югай В.Я., Будяков П.С. RS-триггер с многозначным внутренним представлением сигналов // Патент России № 2514789. 2014.
17. Чернов Н.И., Югай В.Я., Прокопенко Н.Н., Будяков П.С. Логический элемент «2-И» с многозначным внутренним представлением сигналов // Патент России № 513717. 2014.
18. Чернов Н.И., Югай В.Я., Прокопенко Н.Н., Пахомов И.В. Логический элемент «2-И» с многозначным внутренним представлением сигналов // Патент России № 2513478. 2014.
19. Прокопенко Н.Н., Чернов Н.И., Югай В.Я., Бутырлагин Н.В. Устройство для выделения модуля разности двух входных токов // Патент России № 2520416. 2014.

References

1. Vorotnikov S.A. *Informacionnyye ustrojstva robototekhnicheskikh sistem* [Information devices Robotic Systems]. M: Izd-vo MG TU im. Baumana. 2005. 384 p. (In Russ.).
2. Finn V.K. *Mnogoznachnyye logiki i ih primenenija: Logiki v sistemah iskusstvennogo intellekta* [Many-valued logics and their applications: Logic in artificial intelligence systems]. M.: URSS. 2008. Vol. 2. 240 p. (In Russ.).
3. Карповский М.Г., Москалева Е.С. *Спектральные методы анализа и синтеза дискретных устройств* [Spectral methods of analysis and synthesis of discrete devices]. M.: Energy. 1973. 144 p. (In Russ.).
4. Chernov N.I., Jugaj V.Ja. [Neoclassical synthesis of digital structures by means of analog circuitry]. *Trudy IX Mezhdunarodnogo nauchno-prakticheskogo seminarara «Problemy sovremennoj analogovoj shemotekhniki»* [Proceedings of the XI International "Problems of modern analog circuit design" scientific-practical seminar]. 2012. pp.138–144. (In Russ.).
5. Chernov N.I., Yugai V.Ya., Prokopenko N.N., Butyrlagin N.V. Basic Concept of Linear Synthesis of Multi-Valued Digital Structures in Linear Spaces. Proceedings of IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2013). 2013. pp. 146–149.
6. Prokopenko N.N., Chernov N.I., Jugaj V.Ja. [Linear logic synthesis double digital structures in linear spaces]. *Kongress «IS&IT'13». «Intellektual'nye sistemy'13», «Intellektual'nye SAPR-2013»: trudy konferencij* [Congress «IS & IT'13». "Intelligent sistemy'13", "Intelligent CAD 2013": conference proceedings]. vol.1. Moscow: FIZMATLIT. 2013. pp. 278–283 (In Russ.).
7. Lukaszewicz J. Logika trojwartosciowa. *Ruch Filozoficzny*. 1920. vol. 5. no. 9. (In Polish).
8. Post E.L. Introduction to a General Theory of Elementary Propositions. *Amer. Journ. of Math.* 1921.vol. 43. no 3. pp. 163–185.
9. Stankovic M., Stojkovic S., Stankovic R. S. Representation of Incompletely Specified Binary and Multiple-Valued Logic Functions by Compact Decision Diagrams. IEEE 42nd International Symposium on Multiple-Valued Logic, 2012, pp. 142–147.
10. Nagayama S., Sasao T., Butler J.T. Analysis of Multi-state Systems with Multi-state Components Using EVMDDs. IEEE 42nd International Symposium on Multiple-Valued Logic. 2012. pp. 122–127.

11. Dvornikov O.V., Prokopenko N.N., Chernov N.I., Yugai V.Ya. *Odnorazrjadnyj polnyj summator s mnogoznachnym vnutrennim predstavleniem signalov* [Single-bit full adder with the internal representation of a multi-valued signals]. Pat. No. 2504074. 2014. (In Russ.).
12. Chernov N.I., Yugai V.Ya., Prokopenko N.N., Dvornikov O.V. *Mazhoritarnyj jelement s mnogoznachnym vnutrennim predstavleniem signalov* [Majority element with Multi-Valued Internal Representation of Signals]. Pat. No. 2506696 of Rus. Fed. 2014. (In Russ.).
13. Chernov N.I., Yugai V.Ya., Prokopenko N.N., Dvornikov O.V. *Logicheskij jelement «Iskljuchajushhee ILI» s mnogoznachnym vnutrennim predstavleniem signalov* [Logic Exclusive OR Element with Multi-Valued Internal Representation of Signals]. Pat. No. 2506695 of Rus. Fed. 2014. (In Russ.).
14. Prokopenko N.N., Chernov N.I., Yugai V.Ya. *Logicheskij jelement «I» s mnogoznachnym vnutrennim predstavleniem signalov* [Logic AND Element with Multi-Valued Internal Representation of Signals]. Pat. No. 2509412 of Rus. Fed. 2014. (In Russ.).
15. Prokopenko N.N., Chernov N.I., Dvornikov O.V., Yugai V.Ya. *Logicheskij jelement «I» s mnogoznachnym vnutrennim predstavleniem signalov* [Logic AND Element with Multi-Valued Internal Representation of Signals]. Pat. No. 2509413 of Rus. Fed. 2014. (In Russ.).
16. Prokopenko N.N., Chernov N.I., Yugai V.Ya., Budyakov P.S. *RS-trigger s mnogoznachnym vnutrennim predstavleniem signalov* [RS-Trigger with Multi-Valued Internal Representation of Signals]. Pat. No. 2514789 of Rus. Fed. 2014. (In Russ.).
17. Chernov N.I., Yugai V.Ya., Prokopenko N.N., Budyakov P.S. *Logicheskij jelement «2-I» s mnogoznachnym vnutrennim predstavleniem signalov* [Logic 2-AND Element with Multi-Valued Internal Representation of Signals]. Pat. No. 2513717 of Rus. Fed. 2014. (In Russ.).
18. Chernov N.I., Yugai V.Ya., Prokopenko N.N., Pakhomov I.V. *Logicheskij jelement «2-I» s mnogoznachnym vnutrennim predstavleniem signalov* [Logic 2-AND Element with Multi-Valued Internal Representation of Signals]. Pat. No. 2513478 of Rus. Fed. 2014. (In Russ.).
19. Prokopenko N.N., Chernov N.I., Yugai V.Ya., Butyrugin N.V. *Ustrojstvo dlja vydelenija modulja raznosti dvuh vhodnyh tokov* [Unit for Extracting Modulus of Difference of Two Input Currents]. Pat. No. 2520416 of Rus. Fed. 2014. (In Russ.).

Прокопенко Николай Николаевич — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой информационных систем и радиотехники, Донской государственной технической университет (ДГТУ). Область научных интересов: аналоговая микроэлектроника, аналого-цифровая схемотехника. Число научных публикаций — 599. prokopenko@sssu.ru; ул. Шевченко, 147, Шахты, 346500; р.т.: 8(8636) 226050, Факс: 8(8636) 226050.

Prokopenko Nikolay Nikolayevich — Ph.D., Dr. Sci., professor, head of the information systems and radio engineering department, Don State Technical University (DSTU). Research interests: analog microelectronics, analog-to-digital circuitry. The number of publications — 599. prokopenko@sssu.ru; 147, Shevchenko st., Shakhty, 346500, Russia; office phone: 8(8636) 226050, Fax: 8(8636) 226050.

Чернов Николай Иванович — д-р техн. наук, профессор кафедры систем автоматического управления института радиотехнических систем и управления, Южный федеральный университет (ЮФУ). Область научных интересов: логический синтез

цифровых структур. Число научных публикаций — 120. chernovni@yandex.ru; пер. Некрасовский, 44, ГСП 17А, Таганрог, 347928; р.т.: 89198883412.

Chernov Nikolay Ivanovich — Ph.D., Dr. Sci., professor, professor of the automatic control systems department, Southern Federal University (SFU). Research interests: logic synthesis, multi-valued logic. The number of publications — 120. chernovni@yandex.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928; office phone: 89198883412.

Югай Владислав Яковлевич — к-т техн. наук, доцент, доцент кафедры систем автоматического управления института радиотехнических систем и управления, Южный федеральный университет (ЮФУ). Область научных интересов: аналоговая микроэлектроника, аналого-цифровая схемотехника. Число научных публикаций — 68. yugtag@gmail.com; пер. Некрасовский, 44, ГСП 17А, Таганрог, 347928; р.т.: +79054302206.

Yugay Vladislav Yakovlevich — Ph.D., associate professor, associate professor of the automatic control systems department, Southern Federal University (SFU). Research interests: analog microelectronics, analog-to-digital circuitry. The number of publications — 68. yugtag@gmail.com; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928; office phone: +79054302206.

Поддержка исследований. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 16-19-00122).

Acknowledgements. The article was prepared within the framework of the project 16-19-00122 of the Russian Science Foundation for 2016-2018.

РЕФЕРАТ

Прокопенко Н.Н., Чернов Н.И., Югай В.Я. **Синтез k -значных цифровых IP-модулей для роботов и датчиковых систем на основе линейных преобразований токовых логических сигналов.**

Рассмотрены вопросы выбора математического аппарата логического проектирования элементной базы для работы при высоком уровне электрических помех, повышенной радиации и температуры, сопровождающих робототехнические системы в боевых условиях. Таким математическим аппаратом была выбрана линейная алгебра.

Показано, что особенностью линейной алгебры является возможность свободного выбора аналоговых схмотехнических решений при реализации компонентов цифровых структур и цифровых IP-блоков в целом. Кроме того, логическая функция в линейной алгебре имеет вид разностного представления, при этом выходной сигнал конкретного логического элемента определяется как разность сигналов двух его функциональных узлов, на которые одновременно действуют возмущающие воздействия. В результате влияние возмущений нейтрализуются и диапазон условий работоспособности расширяется.

Разработаны новые, специфичные для аппарата линейной алгебры, методы логического синтеза, а также основные варианты схмотехнических решений цифровой элементной базы рассматриваемого класса. Замечательными особенностями линейной алгебры являются два обстоятельства: единство ТТЛ- и КМОП-схмотехники, а также возможность логического и схмотехнического проектирования как двузначных, так и многозначных IP модулей. Все приведенные схмотехнические решения подверглись моделированию в среде Cadence. Результаты моделирования подтверждают наличие повышенных технических, технологических и эксплуатационных характеристик у линейных цифровых элементов в сравнении с функционально идентичными традиционными элементами потенциальной логики.

SUMMARY

Prokopenko N.N., Chernov N. I., Yugai V. Ya. **Synthesis of k-Valued Digital IP-Modules for Robots and Sensor Systems Based on Linear Transformations of Current Logic Signals.**

The questions of choice of the mathematical apparatus for the logic design of element base to function at high electric noise level, higher radiation and temperature affecting systems of robotics in conditions of fighting are considered. Linear algebra was chosen to be such a body of mathematics.

It was demonstrated that a certain freedom of choice of the analog circuits engineering solutions while implementing components of digital structures and digital IP-units. In addition, a logic function in linear algebra has a form of the difference representation, as this takes place, an input signal of the concrete logic element is determined as a difference of signals of his two functional units which are simultaneously exposed with the external disturbing influences. In consequence of this, environmental influences are neutralized, and a range of performance conditions is widened.

The new, specific for the particular body of linear algebra, the methods of logic synthesis and also the main variants of circuits engineering solutions of the digital elements stock of the class under consideration had been developed. Two peculiar things are the remarkable features of linear algebra: unification of TTL- and CMOS-circuits engineering, and also a possibility of logic and circuits engineering design both double- and multi-valued IP-modules. All the relieved circuits engineering solutions were simulated in the Cadence environment. The results of the computer-aided simulating are confirmed with the presence of enhanced technical, technological and operational characteristics of linear digital elements as compared with functionally identical traditional elements of potential logic.

С.А. Отческий, И.Н. Бурдинский
**АЛГОРИТМ ПОСТТРИАНГУЛЯЦИОННОЙ КОРРЕКЦИИ
КООРДИНАТ АВТОНОМНОГО НЕОБИТАЕМОГО
ПОДВОДНОГО АППАРАТА**

Отческий С.А., Бурдинский И.Н. Алгоритм посттриангуляционной коррекции координат автономного необитаемого подводного аппарата.

Аннотация. В работе предложен алгоритм вычисления координат автономного необитаемого подводного аппарата на базе триангуляционного метода и посттриангуляционной коррекции. Особенностью алгоритма является использование в качестве входных параметров нескольких наборов дальностей аппарат-маяк, вычисленных с разными значениями скорости звука в воде. Проведены исследования, которые показали, что разработанный алгоритм в среднем превосходит триангуляционный метод по точности в два раза.

Ключевые слова: автономный необитаемый подводный аппарат, гидроакустическая навигационная система, позиционирование, вычисление координат, триангуляционный метод.

Otcheskii S.A., Burdinsky I.N. The Post Triangulation Algorithm for Coordinate Correction of an Autonomous Underwater Vehicle.

Abstract. In the paper, an algorithm for calculating the underwater autonomous vehicle position built on the triangulation method and post triangulation correction is proposed. A distinctive feature of the algorithm is that it uses as input multiple sets of distances vehicle-beacon calculated with different values of the speed of sound in water. The research of the developed algorithm has found that the accuracy of the proposed solution is twice higher than the accuracy of the triangulation method.

Keywords: autonomous underwater vehicle; acoustic navigation system; positioning; coordinate calculation; triangulation method.

1. Введение. Мировой океан, несмотря на обширные запасы ресурсов, на сегодняшний день остается наименее исследованной областью земной поверхности. Это связано, прежде всего, с тем, что проведение работ на различных глубинах сопряжено с повышенным риском для человека. Именно поэтому в течение последних десятилетий наблюдается постоянно растущий научный интерес к созданию универсальных робототехнических средств, обеспечивающих косвенное присутствие человека под водой. Автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА) — отдельный класс подводных роботов, которые успели зарекомендовать себя как эффективное и безопасное средство выполнения сложных глубоководных миссий [1]. В качестве основных сфер применения АНПА можно выделить: океанографические исследования, обзорно-поисковые и геологоразведочные работы, мониторинг водной среды, проведение подледных работ [2-4].

Важнейшей задачей обеспечения бесперебойного функционирования АНПА является определение его позиции. От точности вычис-

ленных координат напрямую зависит сложность выполняемых АНПА миссий, надежность его работы, а также степень его автономности. Именно поэтому сегодня наблюдается существенный научный интерес к проектированию систем подводной навигации и позиционирования, а также созданию надежных помехоустойчивых алгоритмов определения позиций [5-7].

Над водой большинство автономных систем при вычислении своих координат полагаются на высокоточные радио или спутниковые системы позиционирования. Под водой сигналы таких систем распространяются только на короткие дистанции, что делает невозможным их использование при проведении глубоководных работ. Технологии определения положения АНПА в морской среде можно условно разделить на три группы [8].

Инерциальная навигация / счисление пути. Оценка текущих координат может быть получена с использование инерциального измерительного модуля, в состав которого входят: акселерометр, гироскоп и вычислительное устройство (микропроцессор) [9]. Вычислительное устройство производит расчет перемещения и ориентации аппарата путем двойного интегрирования линейного ускорения и интегрирования угловой скорости. При каждом новом измерении на основе полученных данных производится вычисление текущей позиции аппарата относительно его положения в момент предыдущего измерения. Альтернативой инерциальному измерительному модулю является система счисления пути. Данная система производит оценку координат относительно предыдущего известного положения на основе данных о курсе и ориентации аппарата, получаемых от соответствующих приборов. Существенным недостатком для методов позиционирования данной группы является наличие мультипликативной ошибки. Точность современных инерциальных измерительных модулей и систем счисления пути составляет порядка 1% от пройденного расстояния. Для устранения накопленной ошибки периодически требуется корректировать координаты с использованием спутниковых или акустических систем [10].

Картографический метод. Определение положения АНПА относительно известных данных о внешней среде, например, по карте морского дна. Для реализации этого метода необходимо два условия: наличие карты района, в котором будут проводиться работы (карта также может быть построена по ходу выполнения миссии с использованием современных SLAM методов [11]); оснащение аппарата необходимым оборудованием, способным обнаружить, идентифицировать и классифицировать особенности окружающей среды (видеокамера, гидролокаторы бокового и секторного обзора и т.д. [12]).

Акустические системы. На сегодняшний день гидроакустические навигационные системы (ГАНС) являются наиболее надежными и перспективными средствами для решения задачи позиционирования АНПА [13]. В основе этих систем лежит принцип измерения времени распространения акустического сигнала, которое при известной скорости звука в воде может быть преобразовано в расстояние между приемником и передатчиком. Имея сеть из передатчиков, установленных на известных позициях, можно по вычисленным расстояниям определить положение приемника. Благодаря рабочему диапазону от нескольких метров до десятков километров, надежности, возможности одновременного обслуживания нескольких подводных аппаратов, на сегодняшний день гидроакустические системы наиболее часто используются при проведении подводных работ.

Ошибка позиционирования ГАНС при незначительных процентных соотношениях может быть критичной при работе на больших дальностях аппарат-маяк. При этом современное развитие технологий акустических систем направлено именно на увеличение рабочего диапазона для обеспечения подводных работ на больших территориях при минимальных затратах. В связи с этим особенно актуальной является задача повышения точности координат АНПА, вычисляемых с использованием ГАНС.

Цель данной работы — исследование и разработка высокоточных алгоритмов вычисления позиции АНПА с использованием акустических систем.

2. Принципы акустического позиционирования. В основе ГАНС лежит принцип измерения времени распространения акустического сигнала между АНПА и набором опорных маяков. Относительное расстояние r между точкой регистрации сигнала и точкой излучения вычисляется по следующей формуле:

$$r \cong v_s \tau c, \quad (1)$$

где v_s — скорость звука в воде; τ — время распространения звуковой волны; c — константа, значение которой зависит от одного из двух способов обмена сигналами:

1) 0,5 — подводный аппарат излучает пилотный сигнал. Каждый опорный маяк при регистрации этого сигнала излучает ответ. В момент регистрации ответа АНПА фиксирует время τ , которое в данном случае называется «two-way TOF»;

2) 1 — каждый опорный маяк периодически, в известные промежутки времени, излучает навигационные сигналы, которые регистрируются подводным аппаратом. Располагая данными о моменте от-

правления сигнала АНПА вычисляет τ , которое в данном случае называется «one-way TOF».

Технология two-way TOF значительно проще в реализации, так как не требует синхронизации внутренних систем отсчета подводного аппарата и опорных маяков. Однако двойной путь прохождения сигнала уменьшает в два раза и так невысокую частоту обновления данных в системах ГАНС. Технология one-way TOF сложнее в реализации, но значительно эффективнее при решении задачи обеспечения навигации нескольких подводных объектов в пределах одной акустической системы.

В соответствии с уравнением (1) задача вычисления позиции подводного аппарата сводится к точному определению двух параметров — времени распространения фронта звуковой волны τ и его скорости v_s . Одновременно с этим можно сделать вывод, что точность вычисления позиции АНПА будет напрямую зависеть от погрешностей измерений параметров τ и v_s .

Основные источники ошибок определения времени распространения звукового сигнала можно разбить на следующие группы:

Потеря мощности сигнала. По мере удаления звуковой волны от излучателя, амплитуда сигнала уменьшается. Потеря мощности определяется формулой:

$$I = I_0 \exp(-\alpha r),$$

где I_0 и I , соответственно, мощности сигнала в момент излучения и на расстоянии r ; α — коэффициент затухания, зависящий от физических характеристик среды (плотности, температуры, солености) и несущей частоты акустического сигнала.

Многолучевая структура распространения звука. Многолучевое распространение сигнала может приводить к искажению частотных характеристик и наложению нескольких копий сигнала друг на друга, что значительно усложняет его регистрацию.

Эффект Доплера. Эффект искажения несущей частоты сигнала возникающий при относительном движении источника и регистрирующего приемника. Изменение несущей частоты может составлять несколько процентов, что является серьезной проблемой для систем, использующих частотную модуляцию.

Акустический шум. Шум является еще одним из доминирующих факторов, влияющих на надежную регистрацию акустического сигнала. Основные источники шума подразделяются на следующие категории: гидродинамические (ветер, волны, турбулентция), биологические (производимые живыми существами), технические (обусловленные активностью человека), термальные (возникающие из-за хаотичного движение молекул воды).

Синхронизация систем отсчета. ГАНС, использующие технологию one-way TOF, требуют синхронизации систем отсчета на стороне приемника и передатчика. Очевидно, что расхождение систем тактирования приведет к потере синхронизации, и как следствие, внесет дополнительную ошибку в оценку координат.

Таким образом, для точного определения времени распространения необходимо решение задачи детектирования акустического сигнала при наличии шумов, значительно превосходящих его по мощности. На сегодняшний день в данном направлении достигнуты значительные успехи. Современные программные и аппаратные средства детектирования сигналов обеспечивают довольно низкие значения ошибок (порядка 1 мкс) измерений времени распространения [14-16].

Задача определения скорости распространения сигнала осложняется ее зависимостью от параметров воды. Скорость звука в воде это комплексная функция температуры T ($^{\circ}\text{C}$), солёности S (тысячных долей) и глубины D (м). В качестве формулы для вычисления v_s (м/с), как правило, применяют упрощенное выражение Вильсона [17]:

$$v_s = 1449 + 4,6T - 0,055T^2 + 0,0003T^3 + 1,39(S - 35) + 0,017D.$$

Выражение Вильсона действительно в интервале T от -4 до 30°C ; S от 0 до 37 долей; D от 0 до 8000 м, при этом точность предсказания v_s составляет $\pm 0,3$ м/с.

Очевидно, что значение скорости звука может существенно различаться для разных областей в районе зоны покрытия ГАНС. Поэтому на практике при вычислении координат АНПА используют среднее значение скорости звука в воде. Для этого перед запуском аппарата производится серия измерений параметра v_s в акватории, где будут производиться подводные работы. Затем на основе полученных измерений определяется среднее значение скорости фронта звуковой волны, которое передается на АНПА для вычисления собственных координат. Использование в расчетах средней скорости звука взамен абсолютной является причиной того, что каждая оценка позиции подводного аппарата будет содержать некоторую ошибку.

Безусловно, разработка новых программных и аппаратных решений для точного определения скорости звука и времени прихода сигнала, оказывает значительное влияние на повышение точности акустических систем. Однако огромное значение также имеют и методы, которые используются при вычислении координат аппарата.

3. Триангуляционный метод. Классическим способом вычисления координат аппарата относительно набора опорных точек являет-

ся триангуляционный метод, используемый в системах спутниковой навигации. Рассмотрим работу метода на примере двумерного случая.

Пусть вектор $P [x, y]$ определяет позицию АНПА, m — число опорных маяков, координаты которых задаются системой векторов $P_{Bi} [x_i, y_i]$; $i = 1..m$. Вектор $d [d_1..d_m]$ содержит расстояния между АНПА и маяками:

$$d_i = \|P - P_{Bi}\| = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}.$$

Представим формулу (1) в следующем виде:

$$r_i = v_s \tau_i = d_i + w_i, \quad (2)$$

где w_i — некоторая погрешность, вызванная ошибками τ и v_s .

Возведем r_i в квадрат:

$$r_i^2 = \|P\|^2 + \|P_{Bi}\|^2 - 2P_{Bi}^T P + \xi_i, \quad (3)$$

где ξ_i — новая случайная помеха описываемая формулой:

$$\xi_i = w_i^2 + 2w_i d_i. \quad (4)$$

Написав уравнения (3) для каждого маяка получим систему следующего вида:

$$2 \begin{bmatrix} P_{B1}^T \\ \vdots \\ P_{Bm}^T \end{bmatrix} P = \begin{bmatrix} \|P_{B1}\|^2 - r_1^2 \\ \vdots \\ \|P_{Bm}\|^2 - r_m^2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \vdots \\ \xi_m \end{bmatrix} + \|P\|^2 \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix},$$

в матричной форме:

$$AP = B + \xi + \|P\|^2 E_m. \quad (5)$$

Система (5) является не линейной относительно вектора P , так как присутствует член $\|P\|^2$. Система приводится к линейной путем умножения левой и правой части на матрицу M (размер $(m - 1)$ на m) следующего вида:

$$\begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 0 & -1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 0 & 0 & \dots & -1 \end{bmatrix}.$$

В итоге из (5) получим систему линейных алгебраических уравнений:

$$MAP = MB + M\xi. \quad (6)$$

Так как величину помехи ξ предсказать невозможно, идея триангуляции заключается в решении методом наименьших квадратов следующей системы:

$$MAP = MB. \quad (7)$$

Работа классического метода рассматривалась в ряде научных статей. В [18] было показано, что погрешность триангуляции незначительна в центре навигационной ячейки и возрастает при приближении АНПА к любому опорному маяку. Для устранения этого недостатка был предложен алгоритм коррекции на основании анализа данных о расстоянии до ближайшего маяка (корректирующий алгоритм № 1). Первый корректирующий алгоритм обеспечивает величину ошибки оценки координат при нахождении АНПА в окрестностях маяков, сравнимую с погрешностью триангуляционного метода в центре навигационной ячейки.

В [19] был произведен подробный анализ работы классического метода, который показал механизм возникновения его ошибок. Также в работе предложен способ коррекции триангуляции на основе анализа соотношений измеренных дальностей до всех опорных маяков (корректирующий алгоритм № 2). Преимуществом второго алгоритма является его высокая стойкость к систематическим ошибкам оценки дальностей r_i , при работе с которыми, первый корректирующий алгоритм, как правило, показывал увеличение погрешности по сравнению с классическим методом.

В представленных работах при изучении методов позиционирования рассматривались статические модели, когда АНПА находился в одном положении и производил несколько циклов измерения дальностей до маяков системы ГАНС с вычислением своей позиции. Исследование динамических моделей показало, что достаточно часто возникают ситуации, когда классический метод показывает неприемлемо высокое отклонение оценки координат аппарата от реального положения, при том что ни первый, ни второй способ коррекции не дают никакого эффекта. Причиной возникновения таких ситуаций является метод наименьших квадратов, который используется в триангуляции при решении системы (7).

Согласно этому методу минимизируется расстояние ($MAP - MB$)², т. е. исходя из (6) результатом будет пара координат x, y , для которой норма $\|M\xi\|^2$ принимает минимальное значение. Так как матрица $M\xi$ имеет вид:

$$\begin{bmatrix} \xi_1 - \xi_2 \\ \vdots \\ \xi_1 - \xi_m \end{bmatrix},$$

норма $\|M\xi\|^2$ минимальна при следующем условии:

$$\xi_1 = \xi_2 = \dots = \xi_m. \quad (8)$$

Исходя из выражения (4) необходимым условием равенства всех ξ_i является одинаковый знак параметра ошибки w_i (так как d_i может быть только положительным). Таким образом, результатом приближения методом наименьших квадратов становится такая позиция АНПА, для которой измеренные дальности до всех опорных маяков содержат строго только положительную ошибку или только отрицательную. Геометрическое пояснение данного принципа представлено на рисунке 1, где ромбами отмечены опорные маяки, звездочкой и треугольником соответственно реальная и вычисленная триангуляционным методом позиции аппарата, дугами показаны измеренные дальности аппарат-маяк.

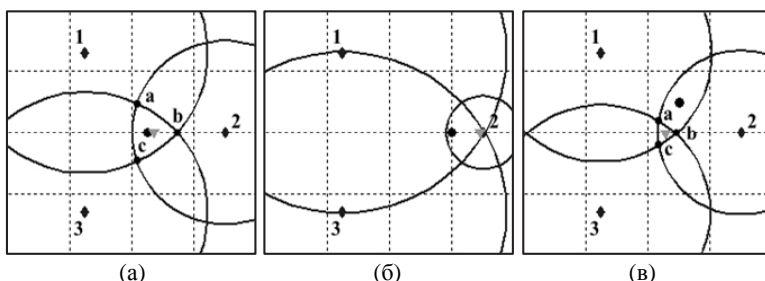


Рис. 1. Вычисление позиции АНПА триангуляционным методом

В первом случае (рисунок 1а) дистанции от аппарата до всех опорных маяков измерены с положительной ошибкой. Дуги, показывающие дальности, образуют замкнутую фигуру а-б-с, внутри которой располагается АНПА. Метод наименьших квадратов, для выполнения условия (8), всегда будет располагать оценочное положение АНПА внутри данной фигуры. Аналогичная ситуация представлена на рисунке 2б, только теперь аппарат находится не в центре навигационной ячейки, а вблизи опорного маяка № 2. Полученная оценка также рас-

полагается внутри замкнутой фигуры, образованной дугами-дистанциями. Здесь начинает проявляться недостаток классического метода, который выражается в «подтягивании» позиции к измеренным дистанциям от дальних маяков. Этот эффект успешно устраняется введением коррекции.

Проблемная ситуация представлена на рисунке 1в. Составляющая ошибки для измеренных дальностей до первого и второго маяков ГАНС положительна, для третьего — отрицательна. Результатом приближения методом наименьших квадратов снова становится позиция расположенная внутри конура $a-b-c$, однако реальное положение АНПА находится за его пределами. Первый и второй корректирующий алгоритмы в данном случае не смогут исправить высокое значение погрешности из-за того, что величина корректирующего смещения (корректирующий фактор) рассчитывается следующим образом:

$$\Delta r = v_s \tau_j - r_j,$$

где τ_j — время распространения звуковой волны между ближайшим маяком и АНПА; r_i — расстояние между маяком и позицией аппарата, рассчитанной триангуляционным методом. Величины такого фактора недостаточно, чтобы существенно исправить погрешность полученной оценки координат.

Можно сделать вывод, что для успешного срабатывания как триангуляционного метода, так и посттриангуляционной коррекции необходимо, чтобы все дальности аппарат-маяк были измерены с погрешностью одного знака. То есть, чтобы оценка дальности всегда была либо больше, либо меньше реального значения.

Как уже отмечалось выше, на практике при вычислении дальностей АНПА-маяк используют предварительно измеренное среднее значение скорости звука в районе проведения работ. В таких условиях допускают, что погрешность w_i имеет нормальный закон распределения с математическим ожиданием в нуле. То есть в каждом отдельно случае дистанция аппарат-маяк может быть измерена как с положительной, так и отрицательной погрешностью. Также, при покрытии акустической системой большой территории, может возникнуть ситуация, когда фактическая скорость распространения сигнала будет отличаться для отдельных областей внутри навигационной ячейки. Использование средней скорости звука в воде при расчетах в таком случае приведет к постоянной положительной погрешности в оценке дальности для одних опорных маяков и отрицательной для других [20].

Обеспечить постоянный знак w_i для всех оценок дальности можно путем внесения дополнительной отрицательной или положительной систематической ошибки. То есть использовать при расчетах скорость звука больше или меньше измеренного среднего значения. Это практически исключит возможность возникновения ситуации, показанной на рисунке 1в. Но в общем, введение дополнительной систематической погрешности понизит общий уровень точности методов вычисления координат АНПА.

Другим, более рациональным способом обеспечения постоянно-го знака ошибки w_i является использование оптимальной величины скорости звука для каждого опорного маяка в отдельности.

4. Подбор значений скорости звука в воде. Определить оптимальное значение скорости звука, для каждого опорного маяка можно путем рассмотрения некоторого конечного числа вариантов. Допустим при регистрации аппаратом навигационного сигнала, вычисляется три оценки дальности. Вектор r_i в таком случае будет иметь следующий вид:

$$r_i = [v_s(1 - \alpha)\tau_i, \quad v_s\tau_i, \quad v_s(1 + \alpha)\tau_i], \quad (9)$$

где α — процентный коэффициент, характеризующий отклонение использованного при оценке значения скорости распространения сигнала от измеренного среднего.

Определив такой вектор для каждого из m опорных маяков, возникает m^3 комбинаций дальностей для вычисления позиции АНПА. Можно сделать предположение, что способ подбора значений скорости звука является потенциально эффективным, если хотя бы одна комбинация из данного набора позволяет в результате оценки позиции получить лучший результат, чем использование в расчетах средней скорости звука.

Для проверки указанного предположения была произведена серия численных экспериментов на модели ячейки ГАНС, состоящей из трех маяков. На рисунке 2а представлен результат работы триангуляционного метода, входными параметрами для которого служили только наборы дальностей, рассчитанных с использованием среднего значения скорости звука в воде. На рисунке 2б представлен результат работы классического метода с посттриангуляционной коррекцией алгоритмом № 2. В качестве входных параметров использовались 3^3 комбинаций дальностей с коэффициентом α равным 5%, а на выходе производилась выборка наилучшего по точности результата.

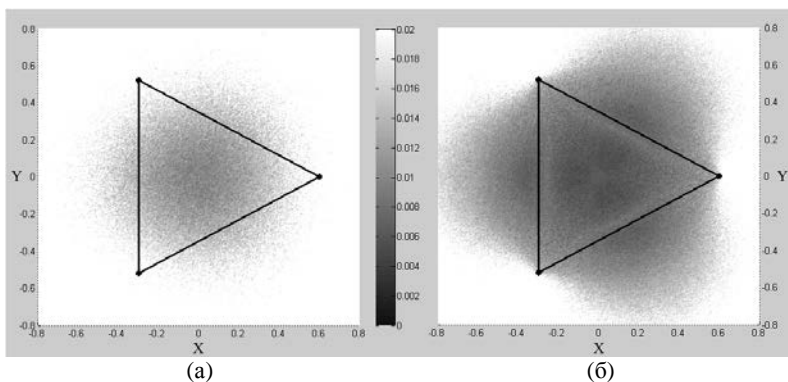


Рис. 2. Ошибка вычисленной позиции АНПА: (а) триангуляционным методом; (б) классическим методом

Представленные графики ставят в соответствие каждой паре координат (x, y) , значение ошибки оценки позиции АНПА (в процентах от длины базисной линии — расстояния между двумя соседними маяками). В модели присутствовала случайная ошибка измерения дальности, которая имела нормальное распределение с математическим ожиданием в нуле и среднеквадратическим отклонением 5%.

Триангуляционный метод, с коррекцией и подбором оптимальной скорости звука в расчетах, показал существенное расширение области минимальной ошибки как внутри навигационной ячейки, так и снаружи. Стоит отметить, что для эффективной работы второго корректирующего алгоритма необходимо, чтобы в измеренных дальностях присутствовала систематическая ошибка. Введение этой ошибки в измерения отдельных маяков, которое осуществлялось путем перебора всех комбинаций дальностей, также позволило второму способу коррекции успешно исправлять ошибки триангуляционного метода, повысив общий уровень точности.

Представленные результаты позволяют судить о целесообразности применения различных значений скорости распространения акустического сигнала при вычислении позиции аппарата. Для создания алгоритма необходимо установить критерий выбора оптимальной позиции из набора, полученного с помощью перебора различных комбинаций измеренных дальностей на входе классического метода. Если АНПА находится в движении, новую пару координат можно выбрать относительно предыдущего положения аппарата, оценив вероятность его перемещения в одну из предполагаемых точек. С учетом этого был разработан новый алгоритм для вычисления позиции подводного аппарата.

5. Алгоритм вычисления позиции. Рассматриваемый алгоритм включает в себя следующие задачи:

1) Произвести расчет векторов дальностей r_i ; $i = 1..m$ по формуле (9).

2) Сформировать m^3 наборов дальностей

$$\{r_1[j_1], r_2[j_2], \dots, r_m[j_m]\}, \quad j_1, j_2, \dots, j_m = 1..3.$$

3) Для каждого набора с помощью триангуляционного метода вычислить оценку координат $P_k [x_k, y_k]$, $k = 1..m^3$.

4) Путем коррекции результатов триангуляционного метода вторым корректирующим алгоритмом сформировать набор уточненных координат $\overline{P}_k [\overline{x}_k, \overline{y}_k]$, $k = 1..m^3$.

$$(|P' - \overline{P}_k| - v_{AUV}t) \rightarrow \min, \quad (p - a_{AUV}) \rightarrow \min,$$

где P' — вектор, содержащий координаты предыдущего вычисленного положения АНПА; v_{AUV} — скорость движения аппарата; t — временной интервал между двумя последовательными событиями регистрации АНПА навигационных сигналов от всех опорных маяков; a_{AUV} — орт вектора, определяющий направление движения аппарата; p — орт вектора перемещения ($P' - \overline{P}_k$).

Для проверки разработанного решения было произведено компьютерное моделирование его работы на базе модели ячейки ГАНС, состоящей из трех опорных маяков.

6. Исследование эффективности алгоритма. При проведении исследования рассматривались динамические модели, подразумевающие непрерывное движение аппарата в ходе выполнения обзорно-поисковых работ. Именно такие миссии требуют от навигационного обеспечения АНПА максимально точной привязки пройденной траектории к географическим координатам. Характер движения аппарата задавался как стандартный галс. В качестве зоны проведения работ был выбран центр навигационной ячейки.

Сводная статистика по ошибке, собранная в ходе моделирования представлена в таблице 1. Результаты приведены в процентах от длины базы системы ГАНС — расстояния между двумя опорными маяками.

Задача позиционирования решалась следующими методами:

1. классический триангуляционный метод;
2. триангуляционный метод с посттриангуляционной коррекцией алгоритмом № 1;
3. разработанный алгоритм.

Ошибки w_i измеренных дальностей аппарат-маяк в модели задавались случайным образом по нормальному закону распределения с параметрами: математическое ожидание — 0; среднее квадратическое

отклонение — 5%. При исследовании эффективности учитывались следующие статистические параметры погрешности оценки позиции: максимальное значение ошибки (MAX), среднее значение ошибки (MEAN), среднеквадратическое отклонение ошибки (δ).

Таблица 1. Оценка эффективности разработанного алгоритма

	Классический метод	Триангуляция + коррекция №1	Разработанный алгоритм
MAX (%)	6,52	6,19	1,93
MEAN (%)	1,59	1,57	0,86
δ (%)	0,93	0,93	0,41

Исследования показали, что разработанный алгоритм обеспечивает результат по средней точности практически вдвое лучше по сравнению с классическим методом. Также вдвое сокращается отклонение погрешности от среднего. В основном это происходит благодаря использованию нескольких значений скорости звука в воде при расчетах, что позволяет поддерживать одинаковый знак составляющей w_i для реального положения аппарата. Таким образом, исключаются ситуации выброса оценки позиции вычисленной методом наименьших квадратов, показанные на рисунке 1в.

Разработанный алгоритм показал высокую точность позиционирования на протяжении всей траектории движения аппарата. При этом максимальные значения ошибок вычисленных координат аппарата соизмеримы со средней погрешность триангуляционного метода.

7. Заключение. Разработанный алгоритм вычисления позиции с подбором оптимальных значений скорости звука в воде был реализован в программном коде и показал свою высокую эффективность в результате серии численных экспериментов. Это позволяет судить о целесообразности его практического применения для повышения точности навигационного обеспечения АНПА.

Стоит отметить, что вычислительная сложность разработанного алгоритма напрямую зависит от числа маяков в ячейке ГАНС. При этом с ростом количества маяков в конфигурации акустической системы сложность алгоритма будет возрастать в геометрической прогрессии. Однако на практике в подавляющем большинстве случаев используются системы из трех маяков. Для такой конфигурации вычислительная сложность разработанного алгоритма является достаточной для того, чтобы адаптировать его для большинства современных подводных аппаратов без возникновения необходимости увеличения вычислительной мощности.

В настоящее время проводится работа по апробации полученных в данной работе результатов, а также их внедрению в состав навигационного обеспечения подводных аппаратов Института проблем морских технологий Дальневосточного отделения Российской академии наук.

Литература

1. *Агеев М.Д.* Автономные подводные роботы. Системы и технологии // М.: Наука. 2005. 398 с.
2. *Инзарцев А.В. и др.* Применение автономного необитаемого подводного аппарата для научных исследований в Арктике // Подводные исследования и робототехника. 2007. № 2(4). С. 5–14.
3. *Bingham B. et al.* Robotic tools for deep water archaeology: Surveying an ancient shipwreck with an autonomous underwater vehicle // Journal of Field Robotics. 2010. vol. 27. no 6. pp. 702–717.
4. *Williams S.B. et al.* Monitoring of benthic reference sites: using an autonomous underwater vehicle // IEEE Robot. Autom. Mag. 2012. vol. 19. no. 1. pp. 73–84.
5. *Han G. et al.* Localization algorithms of underwater wireless sensor networks: A survey // Sensors. 2012. no. 12(2). pp. 2026–2061.
6. *Arrichiello F. et al.* Observability metric for the relative localization of AUVs based on range and depth measurements: theory and experiments // IEEE IROS. 2011. pp. 3166–3171.
7. *Barisic M., Vasilijevic A., Nad D.* Sigma-point Unscented Kalman Filter used for AUV navigation // 20th Mediterranean Conference on Control and Automation. IEEE. 2012. pp. 1365–1372.
8. *Paull L. et al.* AUV navigation and localization: A review // IEEE Journal of Oceanic Engineering. 2014. vol. 39. no. 1. pp. 131–149.
9. *Troni G., Whitcomb L. L.* Experimental evaluation of a MEMS inertial measurements unit for Doppler navigation of underwater vehicles // IEEE Oceans. 2012. pp. 1–7.
10. *Burdinskii I. Otcheshkii S.* Autonomous Underwater Vehicle Localization Using a Single Transponder Acoustic Positioning System // 22nd St. Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems. Russia. 2015. pp. 172–175.
11. *Aulinas J. et al.* Vision-based underwater SLAM for the SPARUS AUV // Proceedings of the 10th International Conference on Computer and IT Applications in the Maritime Industries. Germany. 2011. pp. 171–179.
12. *He B. et al.* AUV SLAM and experiments using a mechanical scanning forward-looking sonar // Sensors. 2012. no. 12(7). pp. 9386–9410.
13. *Kinsey J.C., Eustice R.M., Whitcomb L.L.* A survey of underwater vehicle navigation: Recent advances and new challenges // IFAC Conference of Maneuvering and Control of Marine Craft. Lisbon. 2006. vol. 88.
14. *Chen J., Benesty J., Huang Y.* Time delay estimation in room acoustic environments: an overview // EURASIP J. Appl. Signal Process. 2006. pp. 170–188.
15. *Karabanov I.V. Linnik M.A., Burdinskiy I.N.* Threshold Methods of Sonar Pseudonoise Phase-shift Signal Detection // The First Russia and Pacific Conference on Computer Technology and Applications (Russia Pacific Computer 2010). Russia. 2010. pp. 404–408.
16. *Burdinkiy I.N., Mironov A.S., Myagotin A.V.* A multichannel correlational detector of pseudonoise hydroacoustic signals // 16th St. Petersburg international conference on integrated navigation systems. 2009. pp. 218–219.
17. *Wilson W.D.* Equation for the speed of sound in sea water // J. Acoust. Soc. Amer. 1960. vol. 32. no. 10. p. 1357.
18. *Myagotin A.V., Burdinsky I.N.* A framework of an acoustic navigation network servicing multiple autonomous underwater vehicles // Proceedings of the IASTED. Russia. 2010. pp. 261–266.
19. *Отчешкий С.А., Бурдинский И.Н.* Коррекция триангуляционного метода определения позиции автономного необитаемого подводного аппарата // Известия ЮФУ. Технические науки. 2013. № 3(140). С. 96–103.

20. Матвиенко Ю.В. и др. Экспериментальные исследования особенностей подводной дальнометрии в шельфовой зоне Японского моря // Подводные исследования и робототехника. 2009. № 2(8). С. 44–49.

References

1. Ageev M.D. *Autonomnye podvodnye roboty. Sistemy i tekhnologii* [Autonomous Underwater Robots. Systems and Technologies], Moscow: Nauka. 2005 398 p. (In Russ.).
2. Inzartsev A.V. et al. [The application of Autonomous underwater vehicle for scientific research in the Arctic]. *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika – Underwater Researches and Robotics*. 2007. no. 2(4). pp. 5–14. (In Russ.).
3. Bingham B. et al. Robotic tools for deep water archaeology: Surveying an ancient shipwreck with an autonomous underwater vehicle. *Journal of Field Robotics*. 2010. vol. 27. no. 6. pp. 702–717.
4. Williams S.B. et al. Monitoring of benthic reference sites: using an autonomous underwater vehicle. *IEEE Robot. Autom. Mag.* 2012.vol. 19. no. 1. pp. 73–84.
5. Han G. et al. Localization algorithms of underwater wireless sensor networks: A survey. *Sensors*. 2012. no. 12(2). pp. 2026–2061.
6. Arrichiello F. et al. Observability metric for the relative localization of AUVs based on range and depth measurements: theory and experiments. *IEEE IROS*. 2011. pp. 3166–3171.
7. Barisic M., Vasilijevic A., Nad D. Sigma-point Unscented Kalman Filter used for AUV navigation. 20th Mediterranean Conference on Control and Automation. IEEE. 2012. pp. 1365–1372.
8. Paull L. et al. AUV navigation and localization: A review. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 2014. vol. 39. no. 1. pp. 131–149.
9. Troni G., Whitcomb L.L. Experimental evaluation of a MEMS inertial measurements unit for Doppler navigation of underwater vehicles. *IEEE Oceans*. 2012. pp. 1–7.
10. Burdinskii I. Otcheskii S. Autonomous Underwater Vehicle Localization Using a Single Transponder Acoustic Positioning System. 22nd Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems. Russia. 2015. pp. 172–175.
11. Aulinas J. et al. Vision-based underwater SLAM for the SPARUS AUV. Proceedings of the 10th International Conference on Computer and IT Applications in the Maritime Industries. Germany. 2011. pp. 171–179.
12. He B. et al. AUV SLAM and experiments using a mechanical scanning forward-looking sonar. *Sensors*. 2012. no. 12(7). pp. 9386–9410.
13. Kinsey J.C., Eustice R.M., Whitcomb L.L. A survey of underwater vehicle navigation: Recent advances and new challenges. IFAC Conference of Maneuvering and Control of Marine Craft. Lisbon. 2006. vol. 88.
14. Chen J., Benesty J., Huang Y. Time delay estimation in room acoustic environments: an overview. *EURASIP J. Appl. Signal Process*. 2006. pp. 170–188.
15. Karabanov I.V. Linnik M.A., Burdinskij I.N. Threshold Methods of Sonar Pseudonoise Phase-shift Signal Detection. The First Russia and Pacific Conference on Computer Technology and Applications (Russia Pacific Computer 2010). Russian. 2010. pp. 404–408.
16. Burdinkiy I.N., Mironov A.S., Myagotin A.V. A multichannel correlational detector of pseudonoise hydroacoustic signals. 16th St Petersburg international conference on integrated navigation systems. 2009. pp. 218–219.
17. Wilson W.D. Equation for the speed of sound in sea water. *J. Acoust. Soc. Amer.* 1960. no. 32(10). p. 1357.

18. Myagotin A.V., Burdinsky I.N. A framework of an acoustic navigation network servicing multiple autonomous underwater vehicles. Proceedings of the IASTED. Russia. 2010. pp. 261–266.
19. Otcheskiy S.A., Burdinskiy I.N. [Correction of triangulation method for determination the position of an autonomous underwater vehicle]. *Izvestiya YuFU. Tehnicheskie nauki – Tidings SFedU. Engineering sciences*. 2013. no. 3(140). pp. 96–103. (In Russ.).
20. Matviyenko U.V. et al. [Experimental research of features ranging underwater shelf in of sea of Japan area]. *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika – Underwater investigations and robotics*. 2009. no. 2(8). pp. 44–49. (In Russ.).

Отческий Семен Александрович — техник лаборатории интеллектуальных технологий и систем, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИПМТ ДВО РАН), инженер управления научно-исследовательских работ, Тихоокеанский государственный университет (ТОГУ). Область научных интересов: подводная робототехника, обработка сигналов, аппаратные и программные средства определения координат в морской среде. Число научных публикаций — 13. semgog@yandex.ru; ул. Суханова, д. 5а, г. Владивосток, 690091; р.т.: +7 (423) 243-24-16, Факс: +7 (423) 243-24-16.

Otcheskii Semen Aleksandrovich — technician of the intellectual technologies and systems laboratory, Institute of Marine Technology Problems, engineer of scientific research management department, Pacific National University (PNU). Research interests: underwater robotics, signal processing, hardware and software for positioning in the marine environment. The number of publications — 13. semgog@yandex.ru; 5a, ul. Suhanova, Vladivostok, 690091, Russia; office phone: +7 (423) 243-24-16, Fax: +7 (423) 243-24-16.

Бурдинский Игорь Николаевич — к-т техн. наук, доцент, заведующий лабораторией интеллектуальных технологий и систем, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИПМТ ДВО РАН), старший научный сотрудник управления научно-исследовательских работ, Тихоокеанский государственный университет (ТОГУ). Область научных интересов: подводная робототехника, обработка сигналов, аппаратные и программные средства определения координат в морской среде. Число научных публикаций — 150. igor_burdinsky@mail.ru; ул. Суханова, д. 5а, г. Владивосток, 690091; р.т.: +7 (423) 243-24-16, Факс: +7 (423) 243-24-16.

Burdinsky Igor Nikolayevich — Ph.D., associate professor, head of the intellectual technologies and systems laboratory, Institute of Marine Technology Problems, senior researcher of scientific research management department, Pacific National University (PNU). Research interests: underwater robotics, signal processing, hardware and software for positioning in the marine environment. The number of publications — 150. igor_burdinsky@mail.ru; 5a, ul. Suhanova, Vladivostok, 690091, Russia; office phone: +7 (423) 243-24-16, Fax: +7 (423) 243-24-16.

РЕФЕРАТ

Отческий С.А., Бурдинский И.Н. **Алгоритм посттриангуляционной коррекции координат автономного необитаемого подводного аппарата.**

В статье рассматривается проблема вычисления координат подвижного необитаемого подводного аппарата с помощью гидроакустических навигационных систем. Целью исследования является повышение точности оценки координат аппарата при его движении. Установлено, что для успешной работы триангуляционного метода и посттриангуляционной коррекции координат необходимо, чтобы погрешности оценки дальности до всех опорных маяков имели одинаковый знак. Для выполнения данного условия предложена идея подбора оптимального значения скорости звука при оценке дальностей для каждого маяка в отдельности. Разработан алгоритм вычисления позиции, построенный на базе триангуляционного метода и посттриангуляционной коррекции координат. Особенностью алгоритма является использование в качестве входных параметров нескольких наборов дальностей аппарат-маяк, вычисленных с разными значениями скорости звука в воде. Выбор итоговой оценки позиции производится из выходного набора, на основе данных о перемещении подводного аппарата относительно предыдущего известного положения. Разработанный алгоритм реализован в программном коде и проверен серией численных экспериментов. В ходе моделирования было установлено, что предложенное решение в среднем превосходит триангуляционный метод по точности в два раза.

SUMMARY

Otcheskii S.A., Burdinsky I.N. **The Post Triangulation Algorithm for Coordinate Correction of an Autonomous Underwater Vehicle.**

The article considers the problem of calculating the coordinates of an autonomous underwater vehicle with the use of sonar navigation systems. The aim of this research is to improve the coordinate evaluation accuracy of the moving vehicle. It was determined that for the successful operation of the Triangulation method and post triangulation coordinates correction it is necessary that estimation errors for all reference beacons have the same error's sign. To accomplish this condition, the idea of selecting the optimum value of the speed of sound in the evaluation of distances separately for each beacon was proposed. An algorithm for calculating the vehicle position built on the triangulation method and post triangulation correction was developed. A distinctive feature of the algorithm is that it uses as input multiple sets of distances vehicle-beacon calculated with different values of the speed of sound in water. Selection of the final assessment position produced from the output set based on data on the movement of the underwater vehicle relative to the previous known position. The algorithm is implemented in the source code and tested by a series of numerical experiments. During simulation it was found that the accuracy of the proposed solution is twice higher than the accuracy of the triangulation method.

А.А. БРАНИЦКИЙ, И.В. КОТЕНКО
**АНАЛИЗ И КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ ОБНАРУЖЕНИЯ
СЕТЕВЫХ АТАК**

Браницкий А.А., Котенко И.В. Анализ и классификация методов обнаружения сетевых атак.

Аннотация. В работе рассматриваются различные методы обнаружения сетевых атак. Основное внимание уделяется построению обобщенной классификационной схемы методов обнаружения сетевых атак, представлению сущности каждого из рассмотренных методов и их сравнительному анализу в рамках предложенной классификационной схемы.

Ключевые слова: сетевые атаки, обнаружение злоупотреблений, обнаружение аномалий, сетевой трафик.

Branitskiy A.A., Kotenko I.V. Analysis and Classification of Methods for Network Attack Detection.

Abstract. Different methods of detection of network attacks are considered in the paper. The paper focuses on the construction of the generalized classification scheme of methods of network attack detection, description of each of the above methods and their comparative analysis within the proposed classification scheme.

Keywords: network attacks, misuse detection, anomaly detection, network traffic.

1. Введение. Стремительное развитие компьютерных сетей и информационных технологий вызывает ряд проблем, связанных с безопасностью сетевых ресурсов, которые требуют новых подходов. В настоящее время вопросы построения систем обнаружения атак представляют собой актуальное направление в области информационных технологий. Существует множество работ, посвященных тематике обнаружения и классификации атак с применением разнообразных методов, которые включают традиционные подходы на основе соответствия сигнатурным образцам и адаптивные модели с применением методов интеллектуального анализа данных (ИАД). Большинство этих работ были сделаны достаточно давно, и некоторые из них имеют ограниченный аспект в форме охвата только конкретной предметной области, а именно, обнаружения злоупотреблений или аномалий.

Настоящая работа нацелена на анализ известных методов для обнаружения и классификации сетевых атак и построение обобщенной схемы классификации этих методов. Статья имеет следующую структуру. В разделе 2 представлена схема классификации методов. В разделе 3 рассмотрены поведенческие методы. Раздел 4 посвящен описанию методов на основе знаний. Раздел 5 содержит методы машинного обучения. Методы вычислительного интеллекта представлены в разделе 6. Гибридные методы рассмотрены в разделе 7. В разделе 8 предложены

рекомендации по применению методов ИАД в задачах обнаружения сетевых аномалий.

2. Схема классификации методов обнаружения атак. Обще-принятая классификация систем обнаружения атак по способам выявления атак включает системы обнаружения аномалий и системы обнаружения злоупотреблений [1]. Одной из классических работ в области обнаружения злоупотреблений является работа [2]. На рисунке 1 представлена схема обнаружения сетевых аномалий [3] на основе показателей сетевого трафика.

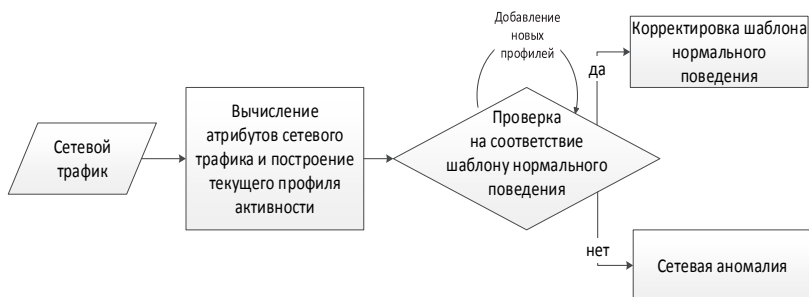


Рис. 1. Схема обнаружения сетевых аномалий

Общий алгоритм выявления сетевых аномалий может быть описан следующим образом. Данными для анализа является сетевой трафик, представленный как набор сетевых пакетов, в общем случае фрагментированных на уровне IP. Собранные сырые данные в дальнейшем послужат источником при формировании необходимой информации для последующего анализа. Так, полученные данные могут быть агрегированы за определенный временной интервал и нормализованы с целью задания признаков атрибутов общего вида, которые потребуются при построении текущего профиля активности. Созданный набор признаков сравнивается с набором характеристик нормальной деятельности объекта (пользователя или системы) — шаблоном нормального поведения. Если наблюдается существенное расхождение сравниваемых параметров, то фиксируется сетевая аномалия. В противном случае происходит уточнение шаблона нормального поведения посредством изменения параметров его настройки с учетом текущего наблюдаемого профиля сетевой активности.

Описанный выше алгоритм может включать несколько вариантов исполнения для реализации подсистемы проверки на соответствие шаблону нормального поведения. Простейшим из них является процедура сравнения с пороговой величиной, когда накопленные результа-

ты, описывающие текущую сетевую активность, сравниваются с экспертно заданной числовой планкой. В этом подходе случай превышения значений рассматриваемых параметров указанной границы является признаком сетевой аномалии. Остальные подходы, включая этот, рассмотрены в разделе 3.

Стоит отметить, что построение шаблона нормального поведения является трудоемкой задачей и зачастую не всегда выполнимой. Так, на практике оказывается, что не каждое аномальное поведение является атакой [4]. К примеру, администратор сети может применять отладочные утилиты, такие как ping, traceroute, mtr, для диагностики сетевого окружения. Действия подобного рода не преследуют каких-либо нелегальных умыслов, однако системы обнаружения аномалий распознают эту деятельность как аномальную сетевую активность.

На рисунке 2 показана схема обнаружения злоупотреблений [3] в сетевом трафике.

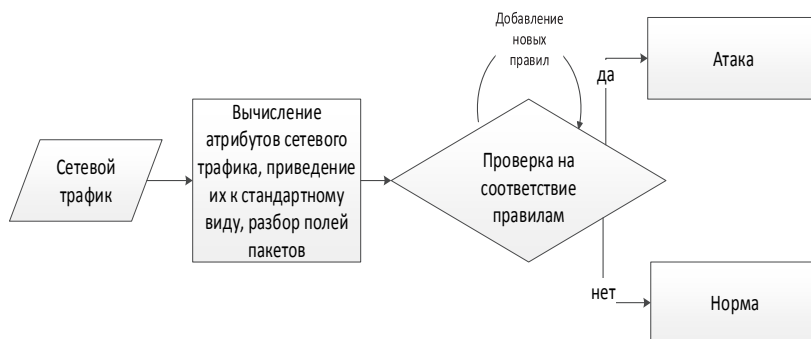


Рис. 2. Схема обнаружения злоупотреблений в сети

Обнаружение злоупотреблений позволяет идентифицировать несанкционированные действия, если имеется их точное представление в виде шаблонов атак. Здесь под шаблоном атаки понимается некоторая совокупность явно описывающих конкретную атаку действий (правил сопоставления, вывода), применяя которые к признакам и полям идентифицируемого объекта можно получить однозначный ответ о его принадлежности к этой атаке. Как и в схеме обнаружения сетевых аномалий, при обнаружении злоупотреблений первичными данными для анализа является сетевой трафик. Выделенные атрибуты и поля сетевых пакетов передаются в модуль, который выполняет поиск и проверку на соответствие входных данных правилам и оповещает о наличии угрозы в случае положительного срабатывания одного из правил.

Ключевой проблемой при создании любой системы обнаружения злоупотреблений является вопрос об эффективном проектировании механизма задания правил. Понятно, что создание исчерпывающей базы правил для выявления всевозможных атак является невозможным в силу нескольких факторов. Один из этих факторов заключается в том, что описание различных вариаций атакующих действий негативно сказывается на производительности системы. А поскольку даже незначительные изменения в атаке приводят к невозможности ее обнаружения методами на основе злоупотреблений, то задаваемые правила должны быть универсальными и покрывать как можно большее число известных модификаций сетевых атак.

Подытоживая сказанное, отметим, что методы обнаружения злоупотреблений являются эффективным инструментом для выявления известных типов атак, но их применимость по отношению к новым атакам, а также к модификациям известных атак является безрезультативной.

Классическими работами в области обнаружения аномалий являются работы [5, 6].

Классификация методов обнаружения атак, предлагаемая в настоящей работе, схематически показана на рисунке 3. Для ее построения был проведен анализ большого перечня работ, в том числе [7-12], который позволил уточнить предложенные в них таксономии и схемы известных методов обнаружения сетевых атак.

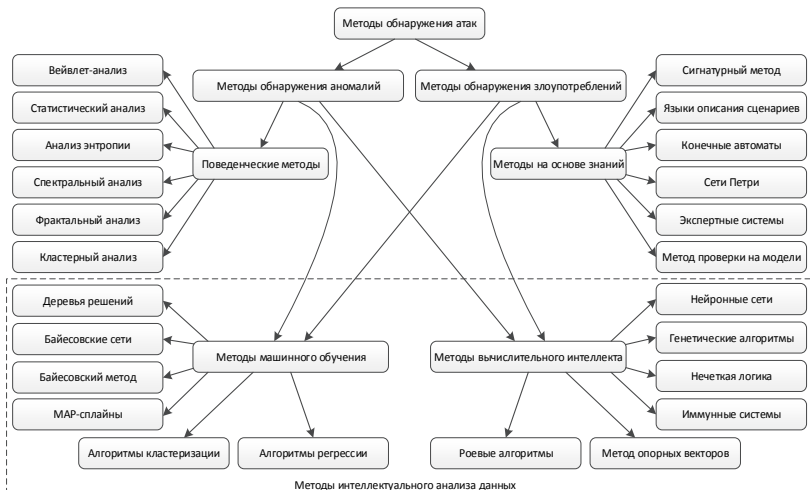


Рис. 3. Классификация методов обнаружения атак

Данная схема разбиения является условной и не претендует на полноту: некоторые из подходов могут относиться к нескольким группам. В частности, экспертные системы и конечные автоматы могут использоваться для обнаружения аномалий, но в большинстве случаев они применяются именно для обнаружения злоупотреблений. Также такие методы вычислительного интеллекта, как нейронные сети и метод опорных векторов, зачастую причисляют к методам машинного обучения. В схеме, соответствующей рисунку 3, выбрано такое разбиение, при котором методы ИАД классифицируются по критерию их принадлежности к биоподобным алгоритмам и поэтому содержат в себе два класса: методы вычислительного интеллекта и методы машинного обучения. Ниже в соответствующих разделах рассмотрена каждая группа представленных методов.

3. Поведенческие методы. Поведенческими методами [13] называются методы, которые основаны на использовании информации о нормальном поведении системы и ее сравнении с параметрами наблюдаемого поведения. Представленная группа методов ориентирована на построение модели штатного, или нормального, функционирования системы или пользователя. В процессе своей работы системы, использующие данный подход, сравнивают текущие показатели активности с профилем нормальной деятельности, и случай значительных отклонений может рассматриваться как свидетельство наличия атаки.

Данные методы характеризуются наличием ложноположительных срабатываний, которые объясняются в первую очередь сложностью точного и полного описания множества легитимных действий пользователей. Кроме того, для большинства подобных систем характерно и необходимо проведение этапа предварительной настройки, во время которого система «набирается опыта» для создания модели нормального поведения. Продолжительность такого интервала для сбора данных может занимать несколько недель, а иногда и несколько месяцев. Указанные недостатки зачастую являются основными причинами отказа от применения систем, построенных на основе поведенческих методов, в пользу тех систем, которые используют точное представление нарушений безопасности в сети.

В данной работе к поведенческим методам отнесены следующие методы обнаружения атак:

- вейвлет-анализ;
- статистический анализ;
- анализ энтропии;
- спектральный анализ;
- фрактальный анализ;

– кластерный анализ.

Вейвлет-анализ заключается в построении коэффициентов, используемых в разложении исходного сигнала по базисным функциям. В качестве сигнала может рассматриваться интенсивность сетевого трафика [14] или данные о корреляции IP-адресов назначения [15]. Выполнение вейвлет-преобразования позволяет выделить наиболее весомую информацию как сигнал, соответствующий колебаниям с высокой амплитудой, и игнорировать менее полезную информацию в колебаниях с низкой амплитудой как шумовую составляющую.

В [16] авторы в качестве исходных данных использовали агрегированные за пятиминутные интервалы средние значения следующих величин: количество байт в секунду, количество пакетов в секунду, количество потоков в секунду, величина среднего размера ТСП-пакета. В каждом случае собранные данные представляли собой дискретную последовательность частотно-временного сигнала, который согласно предложенному алгоритму вейвлет-анализа был декомпозирован в виде иерархии нескольких слоев (strata). Для каждого из извлеченных сигналов переменная времени являлась независимой. Наличие резких амплитуд в каждом из представленных сигналов соответствовало определенным группам аномалий. Так, были выделены следующие группы сетевых аномальных событий:

- аномалии, вызванные ошибками в настройках сетевого оборудования, а также сбоем в работе оборудования (G_1);
- сетевые атаки, представленные классом «отказ в обслуживании» (G_2);
- перегрузки в сети (flash crowd), которые возникают вследствие резких всплесков, например, в моменты увеличения легитимных запросов на скачивание новых релизов программного обеспечения (G_3);
- прочие аномалии, к числу которых относятся обмен большим количеством данных, ошибки во время записи трафика на сенсоре или отправки данных коллектору NetFlow, дающего возможность анализа сетевого трафика на уровне сеансов (G_4);

Были выделены три составляющих компонента первичного сигнала [16]. Низкочастотный компонент сигнала захватывал продолжительные по времени сетевые аномалии, которые могут длиться от нескольких дней. Среднечастотная часть имела нулевое математическое ожидание и была предназначена для анализа колебаний в пределах одного дня. Высокочастотная часть соответствовала небольшим краткосрочным изменениям, которые могут рассматриваться как шум.

После разбиения исходного сигнала авторы [16] применяют к первым двум его компонентам процедуру вычисления локальной дис-

персии в рамках скользящего окна размером 3 часа. Далее применяется метод порогового анализа к взвешенной сумме этих компонентов. Аномалия идентифицируется в случае, если пиковая точка последнего сигнала превысила заданный порог.

В результате исследования был сделан вывод о том, что представленные типы аномальных событий могут быть идентифицированы на конкретных, присущих им частотах. Так, крупнозернистые аномалии классов G_1 , G_2 и G_4 распознаются на высоких и средних частотах, в то время как аномалиям класса G_3 соответствуют низкочастотные и среднечастотные сигналы.

Недостатками вейвлет-анализа являются неоднозначность выбора базисных функций, большая вычислительная сложность при расчете коэффициентов разложения сигнала. Кроме того, нетривиальной является задача правильного задания размера окна. Как было отмечено в [16], если размер скользящего окна намного превышает продолжительность аномалии, то соответствующий ей частотный всплеск может быть сглажен, и тем самым атака будет пропущена. В противном случае, если величина окна слишком малая, то неизбежен поток бессмысленных аномалий.

Статистический анализ [6] является ядром методов обнаружения аномалий в сети. К этой группе относят следующие методы:

- цепи Маркова;
- метод хи-квадрат (χ^2);
- метод среднеквадратических отклонений;
- анализ распределений интенсивности передачи/приема пакетов;
- анализ временных рядов;
- пороговый анализ.

В таблице 1 приведено описание этих подходов.

Отметим, что в статистических системах важную роль играет правильный выбор контролируемых параметров, характеризующих отличия в нормальном и аномальном трафиках. Может получиться так, что из-за неправильного выбора количества наблюдаемых параметров модель описания поведения субъектов в системе окажется неполной или избыточной. Это приводит к пропуску атак или ложным срабатываниям в системе.

Преимуществами статистических систем является их адаптация к изменению поведения пользователя, а также способность к обнаружению модификаций атаки. Среди недостатков можно отметить высокую вероятность возникновения ложных сообщений об атаках и зависимость от порядка следования событий.

Таблица 1. Статистические методы обнаружения сетевых атак

Метод	Краткое описание метода	Преимущества метода	Недостатки метода	Пример применения
Цели Маркова	Используется матрица перехода состояний для задания возможных связей между допустимыми действиями легитимного пользователя. Элементы матрицы — вероятности смены состояний. Событие является аномальным, если вероятность его наступления слишком мала. Вероятность наступления события сводится к вычислению произведения вероятностей отдельных составляющих этого события [17].	Возможность получения промежуточных состояний для дальнейшего анализа вредоносных действий. Возможность применения к упреждающим действиям следующих шагов развития атаки.	Экспоненциальное увеличение числа состояний моделируемой цепи с ростом ее порядка. Необходимость в периодическом изменении параметров модели с целью ее адаптации к изменяющемуся поведению легитимного пользователя.	Обнаружение многошаговых атак. Обнаружение аномалий, которые не соответствуют заданным в цепочке правил спецификациям. Обнаружение медленных, распределенных во времени атак.
Метод χ^2	Тест по критерию χ^2 применяется для проверки того, что некоторая выборка удовлетворяет определенному закону распределения. По правилу трех сигм для нормально распределенной случайной величины, соответствующей измерениям трафика без аномалий, вычисляется верхняя граница изменения ее значения χ^2 . Аномалия фиксируется в случае превышения этой границы значением χ^2 наблюдаемой величины [18].	Высокая теоретическая точность обнаружения в случае нормально распределенных случайных величин (99.7% для 95%-го доверительного интервала).	Предположение о нормальном распределении векторов наблюдаемых измерений, соответствующих трафику без аномалий. Необходимость задания более полной выборки измерений нормального трафика.	Обнаружение сетевых аномалий, характеризующихся увеличением значений наблюдаемых параметров.
Метод средних квадратов отклонений	На основе предыдущих значений наблюдаемых параметров строится доверительный интервал $[m-k\sigma, m+k\sigma]$ для каждой из наблюдаемых величин (m — математическое ожидание, σ — среднеквадратическое отклонение, k — регуляризируемый коэффициент, представленный как отношение z -значения к квадратному корню из объема выборки n). Событие считается аномальным, если значения его параметров не принадлежат этому интервалу.	Наличие адаптивной способности, позволяющей подстраиваться под изменение сетевого окружения.	Возможность постепенного переобучения системы со стороны злоумышленника с целью ее введения в заблуждение о нормальном поведении пользователя. Необходимость создания репрезентативной выборки нужного размера, представленной исключительно легитимным трафиком.	Обнаружение широкого класса атак, характеризующихся резкими амплитудными всплесками относительно стационарного положения.

Анализ распределений интенсивности передачи/приема пакетов	Для данной сети строится модель, описывающая распределение интенсивности передачи пакетов (логнормальное, гамма, пр.). Для трафика без аномалий находятся параметры этого распределения. В тестовом режиме параметры новой построенной модели сравниваются с параметрами эталонной модели. Сетевая аномалия регистрируется в случае значительных расхождений вычисленных параметров.	Возможность наглядного представления аномалий в сети с помощью графиков и гистограмм.	Зависимость качества обнаружения от выбора величины допустимого изменения параметров.	Обнаружение аномальных выбросов сетевого трафика. Обнаружение атак «отказ в обслуживании» типа Flooding. Выявление атак, вызывающих перегрузки сетевого оборудования.
Анализ временных рядов	Временной ряд представляет собой последовательность наблюдений, записанных в определенный момент времени [19]. Вычисленные показатели трафика соответствуют элементам дискретного ряда. Для набора этих измерений строится прогноз с использованием алгоритмов экспоненциального сглаживания, скользящего среднего или авторегрессии, позволяющих выявлять закономерности изменения трафика.	Возможность динамического и долгосрочного прогнозирования трендов, задающих изменения нормального функционирования системы. Возможность обнаружения постепенных, но значительных отклонений от нормального поведения.	Сложность выбора прогнозирующей функции. Усложнение описательной модели для учета сезонности наблюдаемого временного ряда. Низкая эффективность обнаружения атак для случая рядов, не обладающих свойством стационарности.	Обнаружение кратковременных фоновых атак «отказ в обслуживании», приводящих к аномальным всплескам сетевой активности.
Пороговый анализ	Для наблюдаемых параметров задается допустимый диапазон изменения его значений. Нахождение вне рамок этого диапазона соответствует аномальному поведению. Простейшей модификацией, позволяющей снизить количество ложных срабатываний, является добавление счетчика, который накапливает события «выпадения» наблюдаемых параметров из диапазона. При превышении счетчиком определенного значения фиксируется факт наличия аномалии.	Простота реализации и настройки. Отсутствие этапа предварительного обучения. Простота интерпретации полученных результатов, свидетельствующих о нормальности/аномальности событий в сети.	Необходимость тонкого задания числового порога, требующего знаний эксперта и направляющего влияющего на качество обнаружения. Отсутствие адаптивных механизмов для автоматического выбора порога. Необходимость тщательного анализа полученных результатов вследствие возможных необычных временных пропусков атак и ложных срабатываний.	Обнаружение простых видов атак «подбор пароля». Обнаружение атак «отказ в обслуживании» на основе сравнения интегральных характеристик трафика. Обнаружение аномалий, характеризующихся необычным временем суток для активности в сети.

Анализ энтропии используется в обнаружении атак для формирования статистического критерия с целью проверки принадлежности исследуемого экземпляра аномальному классу.

Энтропия множества X определяется следующим образом [20]:

$$H(X) = - \sum_{x \in X} P(x) \cdot \log_2 P(x),$$

где $P(x)$ обозначает вероятность появления элемента x в множестве X .

Суть метода заключается в построении модели, которая максимизировала бы значение энтропии. Это соответствует тому предположению, что с увеличением числа уникальных записей происходит их равномерное распределение относительно выбранных классов множества X , что приводит к увеличению энтропии.

Для обнаружения аномалий в [21] сперва применяется метод максимума энтропии для создания нормальной модели, в которой выделенные классы сетевых пакетов обладают наилучшим равномерным распределением. Далее применяется условная энтропия для выявления отличий между распределением классов пакетов в текущем трафике по сравнению с распределением, найденным в результате метода максимума энтропии.

Спектральный анализ является частным случаем вейвлет-преобразования и позволяет выделять наиболее информативные составляющие исследуемого процесса посредством изменения размерности исходного пространства признаков. Для этих целей анализируется ковариационная матрица элементов исследуемого процесса при помощи метода главных компонент, гусеницы или сингулярного спектрального анализа [22].

Данный подход основан на том предположении, что полученные компоненты аномального трафика отличаются от компонент обычного трафика. Главные компоненты выбираются таким образом, чтобы они соответствовали наибольшей изменчивости исходного процесса. Остальные компоненты могут быть рассмотрены как составляющие шума.

Фрактальный анализ основан на предположении, что сетевой трафик удовлетворяет свойству самоподобия [23], ключевыми понятиями в котором являются параметр Херста H и фрактальная хаусдорфова размерность D :

$$H = \log_{N/2} \frac{R}{S},$$
$$D = 2 - H,$$

где N — длина временного ряда $X = \{x_1, \dots, x_N\}$ со средним значением $\bar{x} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N x_i$, $R = \max_{1 \leq i \leq N} x_i - \min_{1 \leq j \leq N} x_j$ — размах отклонения (изменчивость) ряда, $S = \sqrt{\frac{1}{N-1} \cdot \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}$ — выборочное среднеквадратическое отклонение. Для самоподобных процессов выполняется соотношение $0.5 < H < 1$.

На малых временных отрезках аномальный и нормальный трафики характеризуются различными значениями показателя Херста [24].

Суть *кластерного анализа* заключается в выделении таких характеристик из сетевого трафика, которые позволят разбить классифицируемые объекты (пакеты, соединения) на группы, соответствующие нормальному функционированию сетевого взаимодействия. Все остальные экземпляры, которые не попадают в построенные области, классифицируются как аномальные [25].

4. Методы на основе знаний. К методам на основе знаний относят такие методы, которые в контексте заданных фактов, правил вывода и сопоставления, отражающих признаки заданных атак, производят действия по обнаружению атак на основе заложенного механизма поиска [13]. В качестве процедуры поиска могут применяться сопоставление по образцу, аппарат регулярных выражений, логический секвенциальный вывод, анализ перехода состояний и т.д. Своим названием эти методы обязаны тем, что системы, основанные на их применении, работают с базой знаний, в которой включены описания уже известных атак. Здесь база знаний представлена хранилищем, содержащим записи экспертов с поддержкой логики их обработки и интерпретации (т.е. характеризуется наличием подсистемы логического вывода).

Как уже отмечалось в разделе 2, если отсутствуют точные знания о модификациях вредоносной активности, то данные методы не справляются с обнаружением различных вариаций этой вредоносной деятельности.

В *сигнатурных методах* системные события представляются в виде цепочек символов из некоторого алфавита. Суть этих методов заключается в задании множества сигнатур атак в виде регулярных выражений (regular expressions) или правил на основе сопоставления с образцом (pattern matching) и проверке соответствия наблюдаемых событий этим выражениям. Типичными представителями систем, в которых реализован такой метод, являются Snort [26] и Suricata [27].

Основное преимущество сигнатурного метода заключается в том, что обнаружение известных образцов аномальных событий осуществляется максимально эффективно. Но в то же время использование базы сигнатур большого объема отрицательно влияет на производительность системы обнаружения [1].

Языки описания сценариев предоставляют гибкий механизм обработки контролируемых данных, который заключается в возможности написания собственных скриптов. Такой подход позволяет выявлять такие события, которые трудны для описания при помощи обычных сигнатурных инструментов анализа [7].

Метод на основе *конечных автоматов* (КА) дает возможность моделировать атаки в виде взаимосвязанной сети из состояний и переходов. Вторжение считается успешно реализованным, если последовательность действий атакующего приводит систему из некоторого устойчивого состояния в скомпрометированное. Каждое состояние можно рассматривать как слепок параметров безопасности, а переходы между ними соответствуют успешному срабатыванию события, которое приводит систему в новое состояние. Фактически каждое наблюдаемое событие применяется к нескольким экземплярам КА, каждый из которых представляет собой определенный сценарий атаки.

Одной из первых попыток в реализации этого подхода считается работа [28]. Разработанная авторами [28] программная система USTAT предназначалась для обнаружения атак на UNIX-хосты и включала несколько компонентов. На первом уровне осуществлялся сбор данных из журнала регистрации событий. Полученные данные помещались в постоянное хранилище и подавались на вход препроцессору. Последний представляет собой два отдельных компонента: детектор аномалий на основе профиля пользователя или системы и так называемый STAT-компонент. Каждый модуль препроцессора независимо анализирует события безопасности на наличие скомпрометированного содержимого. В случае выявления угроз оба модуля предоставляют необходимую информацию администратору. Кроме того, администратор имеет непосредственный доступ к сырым данным из журнала аудита.

Сам STAT-компонент включает в себя три модуля: базу знаний, подсистему логического вывода и подсистему принятия решений. Сперва препроцессор обрабатывает сырые данные из журнала регистрации событий и подает их на вход подсистеме вывода, которая отслеживает переходы и сравнивает их со сценариями из базы знаний. Затем подсистема принятия решений определяет действия, которые должны быть выполнены при смене состояния.

Другим примером системы обнаружения злоупотреблений на основе анализа переходов состояний является IDIOT (Intrusion Detection In Our Time), в которой применяется метод раскрашенных *сетей Петри*. Сценарии вторжений кодируются в шаблоны IDIOT, и события безопасности проверяются путем их сопоставления с этими шаблонами [29].

Преимущество данного метода заключается в возможности визуального представления атаки в виде диаграмм перехода состояний, а также в способности системы обнаруживать атаку до ее фактического совершения. Из недостатков можно отметить сложность реализации.

Функционирование *экспертных систем* основано на применении правил вывода к данным о входных событиях. Они представляют собой системы, принимающие решение о принадлежности события к определенному классу атак на основании заданных продукционных правил.

Общий вид продукционного правила следующий [2]: *IF condition THEN action*. В посылке данного правила содержится логическое условие, необходимое для совершения атаки. Когда все условия в левой части правила удовлетворены, выполняются действия, указанные в сукцеденте.

Предполагается, что перед использованием таких систем администратор должным образом их настраивает, задавая необходимые правила. Подобные системы дают возможность использовать человеческий опыт в компьютерных приложениях, которые затем будут применять эти знания для распознавания активностей, соответствующих определенным характеристикам атак.

Достоинства данного метода — возможность отделения управляющей части правила от части, задающей решение, высокая скорость работы и возможность обеспечения отсутствия ложных тревог [2]. Недостатки — неспособность к обнаружению неизвестных атак, зависимость системы от полноты, корректности и актуальности правил, заложенных в базу знаний, снижение эффективности работы с увеличением объема данных.

Также *метод проверки на модели* может быть использован для обнаружения сетевых злоупотреблений [30].

5. Методы машинного обучения. Методы машинного обучения, как и методы вычислительного интеллекта, применяются как при обнаружении аномалий, так и при обнаружении злоупотреблений. Это объясняется тем, что указанные подходы в качестве исходных данных для обучения зачастую используют шаблоны как нормального, так и аномального поведения в сети.

В [31] авторы предложили замену стандартному модулю обнаружения в системе Snort *деревьями решений*. Эксперименты были проведены на наборе данных DARPA [32] и показали увеличение скорости обработки pcap-файлов, используемых для анализа сетевых пакетов, в среднем на 40,3% по сравнению со стандартным модулем.

Одним из наиболее часто используемых подходов для обнаружения вторжений являются байесовские сети. *Байесовская сеть* — это

модель, которая кодирует вероятностные отношения между рассматриваемыми событиями (переменными) и предоставляет некоторый механизм для вычисления условных вероятностей их наступления [33]. Частный случай этой модели — *наивный байесовский классификатор (байесовский метод)* со строгими предположениями о независимости входных переменных. Классификатор позволяет оценить апостериорную вероятность принадлежности экземпляра заданному классу на основе безусловной теоремы Байеса.

В [34] применяются псевдобайесовские оценочные функции для определения априорных и апостериорных вероятностей новых атак. Наивный байесовский классификатор используется для классификации сетевых образцов. В [34] утверждается, что вследствие свойств предложенного метода системе не нужны предварительные знания о шаблонах новых атак.

Предложенная в [34] система ADAM состоит из трех частей: модуля предобработки, интеллектуального модуля и модуля классификации.

Первый модуль собирает данные из TCP/IP трафика и извлекает информацию из каждого соединения в соответствии со следующей схемой $\langle time_stamp, src_ip, src_port, dst_ip, dst_port, conn_status \rangle$, где *time_stamp* — временная метка, *src_ip* — IP-адрес источника, *src_port* — порт источника, *dst_ip* — IP-адрес назначения, *dst_port* — порт назначения, *conn_status* — состояние соединения.

Интеллектуальный модуль применяет правила ассоциации $X \rightarrow Y$ к записям соединений, где X и Y соответственно предусловие и постусловие правил, описанных внутри ядра системы. Этот модуль работает в двух режимах: режиме обучения и режиме обнаружения. В первом режиме происходит построение профилей нормального поведения пользователей и системы, и генерируются правила ассоциации, которые будут использоваться для обучения модуля классификации. Во втором режиме интеллектуальный модуль получает ранее не встречавшиеся правила ассоциации, которые отличаются от профиля. Представлены три уровня работы интеллектуального модуля: обособленный уровень, уровень домена, а также уровень выборки признаков. Первый уровень имеет два режима: статический и динамический анализ. Первый режим используется во время нормальной работы системы, когда создается профиль для поведения системы. Второй режим использует метод скользящего окна для поэтапного анализа правил ассоциации. На уровне домена система отслеживает IP-адреса отправителя и получателя. Соединение считается подозрительным, если эти адреса принадлежат одной и той же подсети. На уровне признаков сис-

тема собирает слепки сетевого поведения каждые три секунды для их последующего анализа. Также существует более длительный процесс выборки признаков, который должен каждые 24 часа обнаруживать медленно происходящие и длительные по времени аномалии.

Модуль классификации соотносит новые правила ассоциации к нормальным или аномальным событиям. Некоторые из аномальных событий могут впоследствии быть классифицированы как атаки. В работе используется функция плотности распределения Дирихле. Она позволяет оценить значения для таблиц контингентности с большим количеством нулей. В данных таблицах колонки соответствуют атрибутам образцов соединений, а строки указывают на класс обучающих данных, который является или нормальным соединением, или типом атаки. Таблица строится таким образом, что значение в ячейке на пересечении i -ой строки и j -ой колонки указывает на количество образцов в обучающей выборке, для которых представлены i -ый класс соединения и j -ый атрибут. Кроме всех классов, представленных в обучающей выборке, добавляется строка в таблице сопряженности для обозначения дополнительного класса, представляющего новый тип атак. Значения в ячейках новой строки заполняются нулями. После чего применяются метод Дирихле, сглаживающий особенности в новой строке, и наивный байесовский классификатор.

Авторы отмечают два основных преимущества их системы — это работа в режиме реального времени и обнаружение аномалий (а не злоупотреблений).

Метод на основе *MAP-слайнов* позволяет построить достаточно точную аппроксимацию поведения обычного пользователя или злоумышленника по заданным параметрам. С этой целью выбирается набор базисных функций, и находятся коэффициенты в линейном разложении по заданному базису и обучающим векторам. В [35] авторы предлагают строить классификаторы на основе *MAP-слайнов* для распознавания 5 выбранных типов сетевых соединений, а также приводят показатели точности обнаружения на данных из набора DARPA 1998 для *MAP-слайнов*, нейронных сетей и метода опорных векторов. Для тестирования использовалась выборка мощностью 6890 записей, для обучения применялось 5092 записи. Из приведенных результатов можно заключить, что *MAP-слайны* и метод опорных векторов показывают большую эффективность в распознавании 4 классов соединений по сравнению с нейронными сетями.

Среди других подходов машинного обучения стоит отметить алгоритмы кластеризации [36, 37] и регрессии [38].

6. Методы вычислительного интеллекта. Искусственная *нейронная сеть* представляет собой набор обрабатывающих элементов — нейронов, связанных между собой синапсами и преобразующими набор входных значений в набор желаемых выходных значений. Нейронные сети применяются в широком спектре приложений: распознавании образов, теории управления, криптографии, сжатию данных. Нейронные сети обладают способностью обучения по образцу и обобщения из зашумленных и неполных данных. В процессе обучения происходит настройка коэффициентов, ассоциированных с синаптическими весами.

В данной работе представлен краткий обзор нескольких моделей нейронных сетей, а именно — многослойных сетей прямого распространения, радиально-базисных сетей, рекуррентных сетей и самоорганизующихся карт.

Для обучения нейронных сетей существует несколько методов. В [35] представлены 12 алгоритмов для их обучения. Одним из самых известных и наиболее используемых алгоритмов обучения многослойных нейронных сетей прямого распространения является метод обратного распространения ошибки. Этот алгоритм представляет собой градиентный спуск с минимизацией среднеквадратичной ошибки на каждой итерации своего выполнения.

В [39,40] для обнаружения вторжений используется многослойная нейронная сеть с двумя скрытыми слоями и выходным слоем, состоящим из трех нейронов. В качестве обучающего и тестового множества была выбрана база данных DARPA. Построенный на данной выборке классификатор был обучен распознавать два типа атак и нормальное соединение. В обеих работах для обучения нейросети используется алгоритм обратного распространения ошибки.

Другой работой, в которой используется эта же база данных, является [41]. В ней показана архитектура многоуровневой нейронной сети, в которой каждый из трех уровней представляет собой отдельный многослойный перцептрон, распределительный слой которого состоит из 30 нейронов. На каждом уровне осуществляется уточнение классификации соединения. Так, на первом уровне определяется, является ли данное соединение атакой или нормальным соединением. Второй и третий уровни отвечают за классификацию соответственно класса и подкласса атаки. Особенностью данного подхода является возможность получения необходимой степени детализации при классификации рассматриваемого соединения.

Дж. Кеннеди [42] использовал трехслойную нейронную сеть как бинарный классификатор сетевых соединений. Обучающее множество, представляющее собой сетевой трафик, полученный с помощью сете-

вого сканера, насчитывало около 10000 образцов соединений, среди которых 3000 записей являлись смоделированными атаками. Хотя этап обучения занимал 26.13 часа, результаты экспериментов показали высокую степень корректности распознавания.

Работы [43, 44] посвящены обнаружению аномалий с использованием нейронных сетей на основе данных, взятых из системного журнала аудита и лог-файлов отдельных приложений. В [43] для задания профиля каждого пользователя применялись наборы из наиболее распространенных команд и частота их использования, а в [44] также использовалась системная информация, в том числе объем системных ресурсов, время работы в системе и пр.

Радиально-базисные нейронные сети — класс нейронных сетей, который базируется на вычислении расстояния от входного вектора до центров нейронов скрытого слоя. Обладая более простой структурой по сравнению с многослойными нейронными сетями, радиально-базисные нейронные сети требуют меньше вычислительных ресурсов и времени для обучения, а значит, они идеально подходят для задач с большим объемом выборки. В [45] приводится обзор работ с применением радиально-базисных нейронных сетей к задачам обнаружения вторжений.

Изобретение рекуррентных нейронных сетей позволило включить элемент памяти в модель нейронных сетей. В [46] авторы использовали данную модель для предсказания следующей последовательности системных вызовов.

Самоорганизующиеся карты, или карты Кохонена, являются однослойными сетями прямого распространения, выходной слой которых представляет собой n -мерную решетку (как правило, $n = 2$ или $n = 3$). После обучения такие сети группируют входные векторы со схожими признаками в отдельные кластеры.

В [47, 48] предлагается использовать самоорганизующиеся карты для обнаружения аномалий. Для этих целей были собраны данные, описывающие легитимное поведение пользователей и включающие характеристики системных вызовов внутри одного и того же UNIX процесса. В [49-51] самоорганизующиеся карты используются для предобработки и кластеризации данных о сетевом трафике. Обработанные данные использовались в качестве входных данных для многослойных нейронных сетей.

В [52] для классификации записей из набора данных DARPA используется радиально-базисная нейронная сеть, в которой первые два слоя представляют собой самоорганизующиеся карты. Результаты экспериментов показали, что данная модель имеет заметно лучшие

показатели классификации по сравнению с радиально-базисными нейронными сетями на наборе данных DARPA.

Генетические алгоритмы (ГА) основаны на имитации биологических принципов естественного отбора и предназначены для решения задач оптимизации [53]. Работа ГА начинается с создания начальной популяции индивидуумов. Каждый представитель популяции задается в виде набора генов (хромосом), представляющих собой символьные или бинарные последовательности (строки) и подвергающихся преобразованиям в процессе эволюции. Новое потомство генерируется при помощи операторов скрещивания и мутации. Эти операторы производят рекомбинацию хромосом и изменение структуры потомков. Для каждой особи нового потомства вычисляется значение приспособленности, которое характеризует показатель эффективности решения данной задачи.

Как правило, ГА применяются в совокупности с другими моделями классификации данных: деревьями решений, элементами нечеткой логики, нейронными сетями и т.д.

В [54] генетическое программирование применяется для создания новых правил распознавания образцов соединений в базе данных DARPA. Обучающая выборка содержит 8 классов атак, тестовое множество состоит из 10000 записей, описывающих 10 классов атак. Каждое правило представляется в виде древовидной структуры. В процессе выполнения операторов скрещивания или мутации заменяется отдельный узел этого дерева или целое поддерево.

В [55] ГА используются для создания начальных популяций нейронных сетей. Предлагается кодировать информацию о весовых коэффициентах и архитектуре нейросети как двоичную последовательность. По завершении работы ГА создается группа нейронных сетей с наиболее выигрышной структурой связи нейронов, количеством скрытых слоев и начальной настройкой весов.

В [56] применяется *нечеткая логика* совместно с ГА. Каждое правило задается четырьмя параметрами a, b, c, d ($a < b < c < d$), которые кодируются как битовая последовательность и выступают в роли начальной популяции на входе ГА. Функция уверенности задается кусочно-линейной функцией, которая на интервале (a, b) принимает значения из $(0, 1)$, на интервале $[b, c]$ имеет значение 1 и на интервале (c, d) принимает значения, линейно убывающие от 1 до 0, в остальных случаях значение функции равно 0. Для каждого параметра соединения создается отдельное правило, подвергающееся улучшениям в процессе работы ГА. Если сумма значений функции уверенности по всем параметрам соединения превышает значение заданного порога, то соединение считается аномальным, иначе соединение классифи-

цируется как нормальное. Недостатком алгоритма является эвристическое задание величины порога.

В [57] для распознавания шаблонов легитимного сетевого трафика и образцов аномальных соединений используются правила классификации вида *if <condition> then <act>*, где *<condition>* — условие, *<act>* — действие. Псылка правила включала девять атрибутов набора данных DARPA, которые кодировались в виде строки из 57 целочисленных значений. Для получения новых правил классификации применялись операторы скрещивания и мутации.

В [58] для генерации правил экспертной системы применяются ГА и деревья решений. Для классификации соединений использовались 5 атрибутов: IP-адреса отправителя и получателя, их порты и тип протокола.

В [59] ГА используются для генерации правил системы обнаружения вторжений Snort на основе данных KDD Cup 99 [60]. Результаты экспериментов доказывают увеличение эффективности обнаружения шаблонов атак и снижение используемых вычислительных ресурсов.

Работа [61] посвящена разработке классификаторов на основе формальных грамматик, описанных с помощью форм Бэкуса-Наура. Авторы приводят пример, в котором каждое правило классификации представляется как вложенная цепочка условных операторов, закодированная последовательностью из 8-битовых значений (кодонов). ГА используется для генерации геномов, состоящих из переменного количества генов. Результатом работы ГА является программа с наибольшим значением функции приспособленности. Для классификации сетевых соединений используется ГА, генерирующий SQL-запросы к базе данных с записями KDD-99.

Вычислительные *иммунные системы* являются прототипом иммунной системы человека, построенным на основных принципах ее работы. Среди основных механизмов функционирования иммунной системы можно назвать создание и обучение иммунных детекторов, уничтожение детекторов, вызывающих ложные срабатывания, ответную реакцию на чужеродные патогены.

Более подробное описание искусственных иммунных систем можно найти в [62]. Первой моделью иммунной системы можно считать сетевую модель, предложенную английским физиологом Н.К. Эрне [63] в середине 70-х гг. 20 века. Данная модель построена на теории иммунной сети, состоящей из взаимосвязанных В-клеток для распознавания внешних антигенов. Согласно этой теории иммунная система представляет собой регулируемую сеть молекул и клеток, способных распознавать друг друга даже в условиях отсутствия антигена.

Теория основана на предположении, что различные клоны лимфоцитов не изолированы друг от друга, а поддерживают связь путем взаимодействия между своими рецепторами и антителами. В свою очередь антитела обладают набором специфических антигенных детерминант, называемых идиотопами. Поэтому такие структуры часто называют идиотипическими сетями [64].

Наиболее распространенными алгоритмами обучения являются отрицательный отбор и клональная селекция. Алгоритм отрицательно-го отбора [65] имитирует процесс созревания Т-клеток внутри тимуса и построен на основе принципов распознавания своего и чужого в системе иммунитета. Главной целью алгоритма является генерация такого набора детекторов, которые не совпадают ни с одним антителом организма. На первой стадии происходит случайное создание Т-клеток. На следующей стадии отсеиваются те клетки, которые реагируют на собственные антитела организма. Тем самым, остаются только те детекторы, которые могут обнаруживать только внешние антигены.

Алгоритм клональной селекции является эволюционным алгоритмом и применяется для решения задач оптимизации. Ключевым понятием данного алгоритма является свойство аффинности, характеризующее близость результата к оптимальному значению. На каждом шаге алгоритма для группы детекторов оптимизируется значение приспособленности [66].

В [67] рассматривают 3 способа генерации антител: положительная селекция, случайная генерация антител и отрицательный отбор.

Первый подход предполагает, что информация о легальном трафике напрямую используется для создания иммунных детекторов. Количество антител равно количеству элементов, описывающих легальный сетевой трафик. Этот метод прост и эффективен в обнаружении аномалий, но увеличение числа детекторов может привести к увеличению вычислительных затрат для обнаружения аномалий.

При случайной генерации антител информация о легальном трафике используется только как тестовое множество для построения популяции детекторов, которые создаются случайным способом. Если расстояние между произвольно созданным кандидатом в иммунные детекторы и одним из представителей легального трафика меньше некоторого порога, то первый включается в набор антител по распознаванию аномалий в сети.

Отрицательный отбор предлагает рассматривать антитела как правила следующей формы:

$$R^k: \text{if } x_1 \in [\min_1^k, \max_1^k] \wedge \dots \wedge x_n \in [\min_n^k, \max_n^k] \text{ then anomaly,}$$

где R^k — k -ое правило, которое может быть интерпретировано как n -мерный гиперкуб с ребрами \min_1^k и \max_1^k , а $\{x_1, \dots, x_n\}$ — параметры подозрительного трафика (антигена).

В отличие от двух предыдущих подходов здесь антитела генерируются так, чтобы покрыть часть n -мерного пространства, не принадлежащего легальному трафику.

Авторы [68, 69] предлагают модель иммунной системы с жизненным циклом Т-лимфоцитов, в которой учитывался процесс их созревания в тимусе, а также активация, формирование клеток иммунной памяти через сигнал костимуляции и гибель иммунных клеток. Разработанная ими система LISYS (Lightweight Immune SYstem) предназначена для обнаружения вторжений в распределенной среде. Хотя эта система обладает рядом преимуществ, включая относительно небольшие вычислительные издержки, надежность и масштабируемость, авторы отмечают некоторые из недостатков. Среди них — невозможность обнаружения сетевых атак с применением протокола UDP и возможность обмануть систему путем проведения распределенных во времени атак типа медленного сканирования.

Работа [70] представляет обзор двухуровневой системы обнаружения вторжений, в которой совмещены преимущества иммунных систем и сетей Кохонена. На первом этапе происходит фильтрация признаков сетевых соединений с помощью иммунных детекторов, обученных по методу отрицательного отбора, тем самым отсеиваются те образцы, которые соответствуют нормальным соединениям. На втором этапе аномальные экземпляры обрабатываются самоорганизующимися картами и группируются в отдельные кластеры со схожими признаками.

В [71] также представлена двухуровневая модель, в которой для обнаружения аномалий применялись иммунные системы, а для обнаружения злоупотреблений использовались нейронные сети с предобработкой входных данных при помощи метода главных компонент.

Классификатор, основанный на *методе опорных векторов* (англ. SVM, support vector machine), применяется, как правило, для классификации элементов из двух линейно разделимых множеств. Суть алгоритма заключается в построении оптимальной гиперплоскости, которая задается линейной комбинацией нескольких опорных векторов из обучающей выборки. В зависимости от расположения элемента по отношению к этой плоскости принимается решение о принадлежности элемента к тому или иному классу. В случае линейной неразделимости этих множеств вводится либо условие, минимизирующее ошибку распознавания (штраф), либо применяются различные ядра (отображения) для перехода к спрямляющим пространствам (возможно, большей размерности, чем

исходное). Существуют различные типы ядер, например, линейное, полиномиальное или гауссовское. В принципе, данное правило классификации попадает под модель Маккаллока-Питтса для построения однослойного перцептрона. Существенное отличие заключается лишь в алгоритме настройки весов (более контролируемое обучение, однозначность и оптимальность решения).

В [72] приведен сравнительный анализ эффективности распознавания образцов данных DARPA 1998 с помощью метода опорных векторов и нейронных сетей с одним скрытым слоем.

Среди других методов вычислительного интеллекта стоит отметить *роевые алгоритмы*, которые моделируют поведение и взаимодействие биологических особей в соответствующих «колониях» или «стаях» [73].

7. Гибридные методы. Существо гибридных подходов заключается в реализации различных схем объединения базовых классификаторов, которое позволяет нивелировать недостатки в их функционировании по отдельности. Выходные значения базовых классификаторов рассматриваются как промежуточные результаты, которые являются вспомогательными при формировании решающего правила верхнеуровневыми классификаторами [74].

В работах [75, 76] представлены три классификатора: дерево решений, SVM и комбинация первых двух классификаторов. Работа гибридного классификатора состояла из двух фаз. Сперва тестовые данные подавались на вход решающих деревьев, которые генерировали узловую информацию. Затем тестовые данные вместе с узловой информацией обрабатывались SVM, который выдавал результат классификации. Ключевой идеей в использовании этого подхода являлось исследование того, насколько узловая информация от дерева решений улучшит эффективность SVM. В случае расхождения результатов классификации, полученных с помощью этих трех методов, окончательный ответ выдавался на основе взвешенного голосования.

В [77] применяется коллектив из 3 нейронных сетей и SVM. Выходное значение гибридного классификатора представляет собой взвешенную сумму выходов от четырех классификаторов, где веса вычисляются посредством минимизации среднеквадратичной ошибки.

В [70] используются искусственные иммунные детекторы и самоорганизующиеся карты Кохонена. Во время выполнения система отслеживает сетевые соединения и для каждого из них формирует вектор признаков. Первый классификатор обучен по алгоритму отрицательного отбора. Поэтому любой вектор, отличный от своих клеток, считается аномальным и подается на вход самоорганизующихся карт

Кохонена. Второй классификатор отображает этот вектор на нейрон внутри кластера множества атак, имеющих общие свойства. Тем самым атаки обнаруживаются детекторами аномалий еще до проецирования на самоорганизующуюся карту.

В [78-80] комбинируется аппарат иммунных систем и нейронных сетей. В качестве иммунных детекторов выбраны многослойные нейронные сети, которые генерируются при помощи метода клональной селекции. Эксперименты были проведены на наборе данных KDD Cup 99, они доказали высокую способность детекторов приспособляться к новым типам атак.

Другим гибридным решением к задаче обнаружения вторжений является комбинирование нескольких нейронных сетей в единый классификатор. Так, работа [81] посвящена применению метода SVM и радиально-базисных сетей для классификации записей из набора данных NSL-KDD. Итоговый классификатор представляется как композиция последовательно построенных на разных выборках классификаторов и процедуры простого голосования. Как результат уровень классификации удалось повысить примерно на 1,6% по сравнению с классификаторами, взятыми по отдельности.

Авторы [77, 82] предлагают подавать выходные значения от нескольких нейронных сетей, обученных различными алгоритмами, на вход процедуры взвешенного голосования и голосования по большинству. На тестовой выборке, состоящей из 6890 образцов, достигнута точность классификации выше 99%.

Статья [83] описывает двухуровневую схему обнаружения и классификации атак. Несколько адаптивных нейро-нечетких модулей объединены вместе. Каждый из них предназначен для обнаружения только одного класса соединений и обрабатывает параметры записей KDD Cup 99. Итоговая классификация выполняется нечетким модулем принятия решений, который реализует систему нечеткого вывода Мамдани с двумя функциями принадлежности. Задачей этого модуля является определение того, насколько аномальной является обрабатываемая запись. Ее класс соответствует классу нечеткого модуля первого уровня с наибольшим выходным значением.

8. Предложения по использованию методов интеллектуального анализа данных в задачах обнаружения сетевых аномалий. В данном разделе рассмотрены несколько проблем, возникающих в процессе решения задачи обнаружения сетевых аномалий при помощи методов ИАД, предложены несколько рекомендаций, которые позволят разработчикам систем обнаружения атак задуматься о целесообразности применения таких подходов.

На данный момент ИАД применяется с большим успехом во многих областях: оптическом распознавании символов, обнаружении спама, идентификации биометрических показателей, построении рекомендательных сервисов. Но в то же время при использовании этой же технологии возникает ряд трудностей с обнаружением аномалий в компьютерных сетях. *С чем может быть связана особенность использования методов ИАД применительно к задаче обнаружения сетевых аномалий и как объяснить природу такого отличия от решения других задач на базе этой же технологии?* По определению обнаружение аномалий включает в себя детектирование ранее не встречавшихся атак, в то время как методы ИАД в контексте постановки такой задачи направлены всего лишь именно на поиск взаимосвязей и закономерностей в сетевом трафике, нахождении активности, похожей на ранее встречавшуюся в обучающей выборке [84]. Строго говоря, это не совсем одно и то же, что многие привыкли считать как способность методов ИАД к обнаружению новых типов атак. Применение инструментов ИАД в готовом виде «из коробки» к задаче обнаружения аномалий приводит к большому числу ложных срабатываний и пропусков атак. В первую очередь это обусловлено тем, что сетевой трафик постоянно меняется изо дня в день. Кроме того, трудно отследить цикличность или сезонность такого изменчивого поведения. Поэтому одним из подходов к решению этой проблемы с использованием методов ИАД является динамическая подстройка интеллектуальных детекторов к изменяющимся условиям. Но все равно в коммерческих реализациях систем обнаружения атак главным образом используются методы на основе правил, с помощью которых можно вручную более тонко отслеживать и задавать варьирование параметров в наблюдаемой сети. Это объяснимо рядом их сильных сторон, среди которых можно назвать возможность обоснования, почему был зафиксирован тот или иной сигнал атаки в конкретный момент времени, а также возможность более простой настройки системы. На основании имеющегося набора правил и характеристик трафика можно выявить причину срабатывания этого правила. При использовании средств ИАД трудно сделать подобные выводы по отношению к детекторам аномалий. Во-первых, сам по себе такой детектор вследствие сложного алгоритма обучения и особенностей своего внутреннего устройства представляет собой черный ящик, функционирование которого скрыто от пользователя и разработчика. Во-вторых, если детектор с течением времени постоянно меняется, то это также усложняет задачу объяснения того факта, что сигнал тревоги, полученный от детектора, действительно является признаком атаки. Для упрощения этой задачи, возможно, потребуется дополнительно вводить процедуру сохранения промежуточ-

ных слепков, отражающих состояния детектора в фиксированные срезы времени, чтобы иметь возможность просмотра истории изменения его состояний с откатом к предыдущим слепкам. В противном случае, если детектор постоянно остается статичным, то это приводит к увеличению показателей ложных срабатываний и пропуска атак в будущем.

Следующей проблемой в области обнаружения аномалий является задача определения того, что же все-таки является нормальным трафиком, а что нет. Ведь если надо обнаруживать аномалии, то необходимо определить фильтр нормальности, чтобы максимально полно описать нормальную деятельность, откидывать все ненормальные действия и обучать модели только на нормальных данных. *Как же отличать случаи, когда действительно легитимный трафик просто меняется, а когда начинается деятельность, свойственная атакующему?* Можно предположить, что смена характера трафика сопровождается резким и мощным всплеском сетевой активности от конкретного узла или подсети и существенными отклонениями наблюдаемых статистических параметров. Но здесь возникает обратная сторона такого отчасти ошибочного и поспешного рассуждения: могут возникать редкие варианты, когда при малых изменениях значений отслеживаемых признаков все равно проводится своеобразная атака. К примеру, атакующий может пытаться постепенно обучать детекторы ИАД, очень медленно приспособливая их к все более вредоносной активности (т.н. «эффект кипяченой лягушки» [85]). После такой подстройки новые детекторы будут принимать ранее аномальные образцы как нормальные. Во избежание таких случаев нужно четко понимать, как отслеживаемые данные меняются с течением времени. Но, к сожалению, это, как правило, трудно осуществимо на практике. Поэтому можно обойтись тем требованием, чтобы детекторы расширяли свою область инспектирования очень медленно, кроме того, полезно задавать некоторые пороговые значения, дальше которых «расширяться» детекторам не дозволено.

Наконец, последний и, пожалуй, один из самых важных вопросов — *как выбирать признаки, характерные для нормального трафика и аномалий и пригодные для обучения моделей ИАД?* Как один из вариантов для решения этого вопроса необходимо опытным путем сначала попробовать строить временные последовательности с наиболее полным набором признаков, характеризующих наблюдаемые явления в сети, и далее на основе экспериментов отсекаать все инвариантные свойства, которые сохраняются при смене типа трафика, как заведомо неинформативные. После этого обучение будет проводиться на наборе оставшихся атрибутов. Другой способ построения признаков заключается в добавлении некоторой автоматизации к описанному выше подходу: сна-

чала в максимально возможном объеме описывается множество всех контролируемых атрибутов, а потом применяются методы корреляционного анализа для устранения компонент, а иногда и их линейных комбинаций, с близкой к нулю дисперсией. Оставшийся набор признаков может быть использован для обучения и проверки модели ИАД.

Итак, *какое применение методов ИАД видится к задаче обнаружения аномалий?* (1) Можно использовать эти методы для задания пороговых значений. (2) Можно использовать их для преобразования (предобработки) входных параметров, к примеру, при помощи следующих методов ИАД: метода главных компонент (PCA, principal component analysis), сингулярного разложения (SVD, singular value decomposition), внешне не связанных уравнений (SUR, seemingly unrelated regressions). (3) Можно использовать их совместно с сигнатурными методами на основе правил.

9. Заключение. В данной работе был проведен сравнительный анализ методов обнаружения и классификации сетевых атак. Рассмотренные подходы успешно используются научным сообществом при разработке систем обнаружения атак. Предложена классификационная схема рассмотренных подходов. Представлены предложения по использованию методов интеллектуального анализа данных в задачах обнаружения сетевых аномалий.

В лаборатории проблем компьютерной безопасности СПИИРАН в течение последних нескольких лет активно проводятся исследования в области обнаружения атак, в том числе в области использования многоагентных технологий для обнаружения вторжений [86-88], механизмов защиты от сетевых червей [89, 90], обнаружения вредоносных файлов [91, 92], использования методов вычислительного интеллекта и гибридных подходов для обнаружения сетевых атак [74, 93, 94].

Перспективными направлениями при проектировании систем обнаружения атак в настоящее время видится гибридизация подходов, которая позволила бы совмещать в себе преимущества сигнатурных и эвристических методов, а также использование технологий больших данных и проактивного мониторинга безопасности [95]. Одним из основных требований, предъявляемых к данным решениям, является обеспечение адаптивной и высоко масштабируемой аналитической обработки событий, обеспечивающей интеллектуальное управление большими объемами данных о безопасности в реальном или близком к реальному масштабе времени.

Литература

1. *Лукацкий А.В.* Обнаружение атак // СПб.: БХВ-Петербург. 2003. 608 с.
2. *Kumar S., Spafford E.H.* A Pattern Matching Model for Misuse Intrusion Detection // Proceedings of the 17th National Computer Security Conference, 1994. pp. 11–21.
3. *Ghorbani A.A., Lu W., Tavallaee M.* Network Intrusion Detection and Prevention: Concepts and Techniques // Springer Science & Business Media. 2009. 212 p.
4. *Шаньгин В.Ф.* Информационная безопасность компьютерных систем и сетей // М.: ИД «ФОРУМ»: ИНФРА-М. 2008. 416 с.
5. *Anderson J.P.* Computer Security Threat Monitoring and Surveillance // Technical report, Fort Washington, Pennsylvania. 1980.
6. *Denning D.E.* An Intrusion-Detection Model // IEEE Transactions on software engineering, 1987, vol. SE-13, Issue 2. pp. 222–232.
7. *Jyothsna V., Prasad V.V.R.* A Review of Anomaly Based Intrusion Detection Systems // International Journal of Computer Applications. 2011. vol. 28, no. 7. pp. 26–35.
8. *Baddar S.A.-H., Merlo A., Migliardi M.* Anomaly Detection in Computer Networks: A State-of-the-Art Review // Journal of Wireless Mobile Networks, Ubiquitous Computing, and Dependable Applications. 2014. vol. 5. no. 4. pp. 29–64.
9. *Gyanchandani M., Rana J.L., Yadav R.N.* Taxonomy of Anomaly Based Intrusion Detection System: A Review // International Journal of Scientific and Research Publications. 2012. vol. 2. Issue 12. pp. 1–13.
10. *Tsai C.F., Hsub Y.F., Linc C.Y., Lin W.Y.* Intrusion detection by machine learning: A review // Expert Systems with Applications. 2009. vol. 36. Issue 10. pp. 11994–12000.
11. *Wu S.X., Banzhaf W.* The Use of Computational Intelligence in Intrusion Detection Systems: A Review // Applied Soft Computing, 2010, vol. 10, Issue 1. pp. 1–35.
12. *Kabiri P., Ghorbani A.A.* Research on Intrusion Detection and Response: A Survey // International Journal of Network Security. 2005. vol. 1, no. 2. pp. 84–102.
13. *Debar H., Dacier M., Wespi A.* Towards a taxonomy of intrusion-detection systems // Computer Networks. 1999. vol. 31. Issue 8. pp. 805–822.
14. *Barford P., Plonka D.* Characteristics of Network Traffic Flow Anomalies // Proceedings of the 1st ACM SIGCOMM Workshop on Internet Measurement. 2001. pp. 69–73.
15. *Kim S.S., Reddy A.L.* Statistical techniques for detecting traffic anomalies through packet header data // IEEE/ACM Transactions on Networking (TON). 2008. vol. 16. Issue 3. pp. 562–575.
16. *Barford P., Kline J., Plonka D., Ron A.* A signal analysis of network traffic anomalies // Proceedings of the 2nd ACM SIGCOMM Workshop on Internet measurement. 2002. pp. 71–82.
17. *Brindasri S., Saravanan K.* Evaluation Of Network Intrusion Detection Using Markov Chain // International Journal on Cybernetics & Informatics (IJCI). 2014. vol. 3. no. 2. pp. 11–20.
18. *Ye N., Chen Q.* An Anomaly Detection Technique Based on a Chi-square Statistic for Detecting Intrusions into Information Systems // Quality and Reliability Engineering International. 2001. vol. 17. Issue 2. pp. 105–112.
19. *Brockwell P.J., Davis R.A.* Introduction to Time Series and Forecasting // Springer Science & Business Media. 2006. 434 p.
20. *Lee W., Xiang D.* Information-theoretic measures for anomaly detection // Security and Privacy. 2001. pp. 130–143.
21. *Gu Y., McCallum A., Towsley D.* Detecting Anomalies in Network Traffic Using Maximum Entropy Estimation // Proceedings of the 5th ACM SIGCOMM conference on Internet Measurement. 2005. pp. 32–32.
22. *Babaie T., Chawla S., Ardon S.* Network Traffic Decomposition for Anomaly Detection // URL: <http://arxiv.org/pdf/1403.0157.pdf>, 2014 (Дата обращения: 08.03.2016).

23. *Крылов В.В., Самохвалова С.С.* Теория телетрафика и ее приложения // СПб.: БХВ-Петербург. 2005. 288 с.
24. *Mazurek M., Dymora P.* Network anomaly detection based on the statistical self-similarity factor for HTTP protocol // *Przeglad elektrotechniczny*, ISSN. 2014. pp. 127–130.
25. *Lee K., Kim J., Kwon K.H., Han Y., Kim S.* DDoS attack detection method using cluster analysis // *Expert Systems with Applications*. 2008. vol. 34. Issue 3. pp. 1659–1665.
26. Snort. Open Source Intrusion Detection System // URL: <https://www.snort.org/> (дата обращения: 22.03.2016).
27. Suricata. Open Source IDS/IPS/NSM engine // URL: <http://suricata-ids.org/> (дата обращения: 22.03.2016).
28. *Ilgun K., Kemmerer R.A., Porras P.A.* State Transition Analysis: A Rule-Based Intrusion Detection Approach // *IEEE Transactions on Software Engineering*. 1995. vol. 21. Issue 3. pp. 181–199.
29. *Kumar S., Spafford E.H.* A software architecture to support misuse intrusion detection // *Proceedings of the 18th National Information Security Conference*. 1995. pp. 194–204.
30. *Zhu W., Zhou Q., Li P.* Intrusion detection based on model checking timed interval temporal logic // *IEEE International Conference on Information Theory and Information Security (ICITIS)*. 2010. pp. 503–505.
31. *Kruegel C., Toth T.* Using Decision Trees to Improve Signature-Based Intrusion Detection // *Recent Advances in Intrusion Detection*. 2003. pp. 173–191.
32. DARPA Intrusion Detection Data Sets // URL: <https://www.ll.mit.edu/ideval/data/> (дата обращения: 22.03.2016).
33. *Heckerman D.* A Tutorial on Learning with Bayesian Networks // *Innovations in Bayesian Networks: Theory and Applications*. 2008. vol. 156. pp. 33–82.
34. *Barbara D., Wu N., Jajodia S.* Detecting Novel Network Intrusions Using Bayes Estimators // *Proceedings of the First SIAM International Conference on Data Mining*. 2001. pp. 1–17.
35. *Mukkamala S., Sung A.H., Abraham A., Ramos V.* Intrusion Detection Systems Using Adaptive Regression Splines // *Sixth International Conference on Enterprise Information Systems*. 2006. pp. 211–218.
36. *Ranjan R., Sahoo G.* A new clustering approach for anomaly intrusion detection // *International Journal of Data Mining & Knowledge Management Process (IJDKP)*. 2014. vol. 4. no. 2. pp. 29–38.
37. *Guan Y., Ghorbani A.A., Belacel N.* Y-means: a clustering method for intrusion detection // *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, 2003. vol. 2. pp. 1083–1086.
38. *Wang Y.* A multinomial logistic regression modeling approach for anomaly intrusion detection // *Computers & Security*. 2005. vol. 24. Issue 8. pp. 662–674.
39. *Sammany M., Sharawi M., El-Beltagy M., Saroit I.* Artificial Neural Networks Architecture for Intrusion Detection Systems and Classification of Attacks // *The 5th international conference INFO2007*. 2007. pp. 24–26.
40. *Moradi M., Zulkernine M.* A Neural Network Based System for Intrusion Detection and Classification of Attacks // *Proceedings of the IEEE International Conference on Advances in Intelligent Systems-Theory and Applications*. 2004.
41. *Selim S., Hashem M., Nazmy T.M.* Intrusion Detection using Multi-Stage Neural Network // *International Journal of Computer Science and Information Security (IJCSIS)*. 2010. vol. 8. no. 4. pp. 14–20.
42. *Cannady J.* Artificial Neural Networks for Misuse Detection // *Proceedings of the 21st National Information Systems Security Conference*. 1998. pp. 368–381.

43. *Ryan J., Lin M.-J.* Intrusion Detection with Neural Networks // *Advances in Neural Information Processing Systems*. 1998. pp. 943–949.
44. *Tan K.* The Application of Neural Networks to UNIX Computer Security // *Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks*. 1995. vol. 1. pp. 476–481.
45. *Sheth H., Shah B., Yagnik S.* A survey on RBF Neural Network for Intrusion Detection System // *Int. Journal of Engineering Research and Applications*. 2014. vol. 4. Issue 12. pp. 17–22.
46. *Gnosh A.K., Michael C., Schatz M.* A Real-Time Intrusion Detection System Based on Learning Program Behavior // *Proceedings of the 3rd International Workshop on Recent Advances in Intrusion Detection (RAID '00)*. 2000. vol. 1907. pp. 93–109.
47. *Hoglund A.J., Hatonen K., Sorvari A.S.* A Computer Host-Based User Anomaly Detection System Using The Self-Organizing Map // *Proceedings of the IEEE-INNS-ENNS International Joint Conference on Neural Networks*. 2000. vol. 5. pp. 411–416.
48. *Wang W., Guan X., Zhang X., Yang L.* Profiling program behavior for anomaly intrusion detection based on the transition and frequency property of computer audit data // *Computers & Security*. 2006. vol. 25. Issue 7. pp. 539–550.
49. *Bivens A., Palagiri C., Smith R., Szymanski B., Embrechts M.* Network-Based Intrusion Detection Using Neural Networks // *Intelligent Engineering Systems through Artificial Neural Networks*. 2002. vol. 12. pp. 579–584.
50. *Cannady J., Mahaffey J.* The Application of Artificial Neural Networks to Misuse Detection: Initial Results // *Proceedings of the 1st International Workshop on Recent Advances in Intrusion Detection*. 1998.
51. *Jirapummin C., Wattanapongsakorn N., Kanthamanon P.* Hybrid Neural Networks for Intrusion Detection System // *Proceedings of the 2002 International Technical Conference on Circuits, Systems, Computers and Communications*. 2002. vol. 7. pp. 928–931.
52. *Horeis T.* Intrusion detection with neural networks – combination of self-organizing maps and radial basis function networks for human expert integration // URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.106.191&rep=rep1&type=pdf>. 2003. (дата обращения: 22.03.2016).
53. *Pawar S.N.* Intrusion Detection in Computer Network using Genetic Algorithm Approach: A Survey // *International Journal of Advances in Engineering & Technology*. 2013. vol. 6. Issue 2. pp. 730–736.
54. *Lu W., Traore I.* Detecting New Forms of Network Intrusion Using Genetic Programming // *Computational intelligence*. 2004. vol. 20. no 3. pp. 475–494.
55. *Jiang H., Ruan J.* The Application of Genetic Neural Network in Network Intrusion Detection // *Journal of computers*. 2009. vol. 4. no. 12. pp. 1223–1230.
56. *Ireland E.* Intrusion Detection with Genetic Algorithms and Fuzzy Logic // *UMM CSci senior seminar conference*. 2013. pp. 1–6.
57. *Li W.* Using Genetic Algorithm for Network Intrusion Detection // *Proceedings of the United States Department of Energy Cyber Security Group*. 2004. pp. 1–8.
58. *Sinclair C., Pierce L., Matzner S.* An Application of Machine Learning to Network Intrusion Detection // *Proceedings of the 15th Annual Computer Security Applications Conference*. 1999. pp. 371–378.
59. *Dave M.H., Sharma S.D.* Improved Algorithm for Intrusion Detection Using Genetic Algorithm and SNORT // *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*. 2014. pp. 273–276.
60. *KDD Cup 1999 Data*. URL: <http://kdd.ics.uci.edu/databases/kddcup99/kddcup99.html> (дата обращения: 22.03.2016).
61. *Wilson D., Kaur D.* Using Grammatical Evolution for Evolving Intrusion Detection Rules // *Proceedings of the 5th WSEAS Int. Conf. on Circuits, Systems, Electronics, Control & Signal Processing*. 2006. pp. 42–47.

62. *De Castro L.N., Von Zuben F.J.* Artificial Immune Systems: Part I - Basic Theory and Applications // Universidade Estadual de Campinas, Dezembro de, Technical Report, 1999. 95 p.
63. *Jerne N.* Towards a network theory of the immune system // *Ann. Immunol. (Inst. Pasteur)*. 1974. pp. 373–389.
64. *Dasgupta D.* Advances in Artificial Immune Systems // *IEEE computational intelligence magazine*. 2006. vol. 1. Issue 4. pp. 40–49.
65. *Forrest S., Perelson A.S., Allen L., Cherukuri R.* Self-Nonself Discrimination in a Computer // *Proceedings of IEEE symposium on research in security and privacy*. 1994. pp. 202–212.
66. *Kim J., Bentley P.J.* The Artificial Immune System for Network Intrusion Detection: An Investigation of Clonal Selection with a Negative Selection Operator // *Proceedings of the Congress on Evolutionary Computation*. 2001. pp. 1244–1252.
67. *Seredinski F., Bourvy P.* Anomaly detection in TCP/IP networks using immune systems paradigm // *Computer communications*. 2007. vol. 30. pp. 740–749.
68. *Hofmeyr S.A., Forrest S.* Architecture for an Artificial Immune System // *Journal of Evolutionary Computation*. 2000. vol. 8. no. 4. pp. 443–473.
69. *Hofmeyr S.A.* An Immunological Model of Distributed Detection and its Application to Computer Security // PhD thesis. Department of Computer Sciences, University of New Mexico. 1999. 113 p.
70. *Powers S.T., He J.* A Hybrid Artificial Immune System and Self Organising Map for Network Intrusion Detection // *Information Sciences*. 2008. vol. 178. Issue 15. pp. 3024–3042.
71. *Zhou Y.P.* Hybrid Model Based on Artificial Immune System and PCA Neural Networks for Intrusion Detection // *Asia-Pacific Conference on Information Processing*. 2009. vol. 1. pp. 21–24.
72. *Chen W.H., Hsu S.H., Shen H.P.* Application of SVM and ANN for intrusion detection // *Computers & Operations Research*. 2005. vol. 32. Issue 10. pp. 2617–2634.
73. *Rozenberg G., Bäck T., Kok J.N.* Handbook of natural computing // Springer Publishing Company, Incorporated. 2011. 2104 p.
74. *Branitskiy A., Kotenko I.* Network attack detection based on combination of neural, immune and neuro-fuzzy classifiers // *The 18th IEEE International Conference on Computational Science and Engineering (IEEE CSE2015)*. 2015. pp. 152–159.
75. *Peddabachigari S., Abraham A., Grosan C., Thomas J.* Modeling intrusion detection system using hybrid intelligent systems // *Journal of Network and Computer Applications*. 2007. vol. 30. Issue 1. pp. 114–132.
76. *Abraham A., Thomas J.* Distributed intrusion detection systems: a computational intelligence approach // *Applications of Information Systems to Homeland Security and Defense*. 2005. pp. 105–135.
77. *Mukkamala S., Sung A.H., Abraham A.* Intrusion detection using ensemble of soft computing paradigms // *Intelligent systems design and applications*. 2003. vol. 23. pp. 239–248.
78. *Vaitsekhovich L.* Intrusion Detection in TCP/IP Networks Using Immune Systems Paradigm and Neural Network Detectors // *XI International PhD Workshop OWD*. 2009. pp. 219–224.
79. *Komar M., Golovko V., Sachenko A., Bezobrazov S.* Development of Neural Network Immune Detectors for Computer Attacks Recognition and Classification // *IEEE 7th Intern. Conf. on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS)*. 2013. vol. 2. pp. 665–668.
80. *Golovko V., Komar M., Sachenko A.* Principles of Neural Network Artificial Immune System Design to Detect Attacks on Computers // *Intern. Conf. on Modern Problems*

- of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET). 2010. p. 237.
81. *Govindarajan M., Chandrasekaran R.M.* Intrusion Detection Using an Ensemble of Classification Methods // Proc. of the World Congress on Engineering and Computer Science. 2012. vol. 1. pp. 459–464.
 82. *Mukkamala S., Sung A.H., Abraham A.* Intrusion Detection Using an Ensemble of Intelligent Paradigms // Journal of Network and Computer Applications. 2005. vol. 28. Issue 2. pp. 167–182.
 83. *Toosi A.N., Kahani M.* A New Approach to Intrusion Detection Based on an Evolutionary Soft Computing Model Using Neuro-Fuzzy Classifiers // Computer Communications. 2007. vol. 30. Issue 10. pp. 2201–2212.
 84. *Sommer R., Paxson V.* Outside the Closed World: On Using Machine Learning For Network Intrusion Detection // IEEE Symposium on Security and Privacy (SP). 2010. pp. 305–316.
 85. *Chan-Tin E., Feldman D., Hopper N., Kim Y.* The Frog-Boiling Attack: Limitations of Anomaly Detection for Secure Network Coordinate Systems // Security and Privacy in Communication Networks. Springer Berlin Heidelberg. 2009. pp. 448–458.
 86. *Котенко И.В., Карсаев О.И.* Использование многоагентных технологий для комплексной защиты информации в компьютерных сетях // Известия ТРТУ. 2001. № 4, С. 38–50.
 87. *Gorodetsky V., Kotenko I., Karsayev O.* The Multi-agent Technologies for Computer Network Security: Attack Simulation, Intrusion Detection and Intrusion Detection Learning // The International Journal of Computer Systems Science & Engineering. 2003. no. 4. pp. 191–200.
 88. *Котенко И.В.* Многоагентные технологии для анализа уязвимостей и обнаружения вторжений в компьютерных сетях // Новости искусственного интеллекта. 2004. № 1. С. 56–72.
 89. *Котенко И.В., Воронцов В.В., Чечулин А.А., Уланов А.В.* Проактивные механизмы защиты от сетевых червей: подход, реализация и результаты экспериментов // Информационные технологии. 2009. № 1. С. 37–42.
 90. *Котенко И.В., Нестерук Ф.Г., Чечулин А.А.* Комбинирование механизмов обнаружения сканирования в компьютерных сетях // Вопросы защиты информации. 2011. № 3. С. 30–34.
 91. *Komashinsky D., Kotenko I.* Malware Detection by Data Mining Techniques Based on Positionally Dependent Features // Proceedings of the 18th Euromicro International Conference on Parallel, Distributed and network-based Processing (PDP 2010). 2010. pp. 617–623.
 92. *Котенко И.В., Комашинский Д.В.* Обнаружение вредоносных документов формата PDF на основе интеллектуального анализа данных // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2012. № 1. С. 19–35.
 93. *Браницкий А.А., Котенко И.В.* Построение нейросетевой и иммунноклеточной системы обнаружения вторжений // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2015. № 4. С. 23–27.
 94. *Браницкий А.А., Котенко И.В.* Обнаружение сетевых атак на основе комплексирования нейронных, иммунных и нейро-нечетких классификаторов // Информационно-управляющие системы. 2015. № 4. С. 69–77.
 95. *Котенко И.В., Саенко И.Б.* К новому поколению систем мониторинга и управления безопасностью // Вестник Российской академии наук. 2014. Том 84. № 11. С. 993–1001.

References

1. Lukatsky A.V. *Obnaruzhenie atak* [Attack Detection]. SPb.: BHV-Petersburg. 2003. 608 p. (In Russ.).
2. Kumar S., Spafford E.H. A Pattern Matching Model for Misuse Intrusion Detection. Proceedings of the 17th National Computer Security Conference. 1994. pp. 11–21.
3. Ghorbani A.A., Lu W., Tavallae M. Network Intrusion Detection and Prevention: Concepts and Techniques. Springer Science & Business Media. 2009. 212 p.
4. Shan'gin V.F. *Informatsionnaya bezopasnost' komputernikh sistem i setey* [Information security of computer systems and networks]. M.: Publisher «FORUM»: INFRA-M. 2008. 416 p. (In Russ.).
5. Anderson J.P. Computer Security Threat Monitoring and Surveillance. Technical report, Fort Washington, Pennsylvania. 1980.
6. Denning D.E. An Intrusion-Detection Model. *IEEE Transactions on software engineering*, 1987, vol. SE-13, Issue 2. pp. 222–232.
7. Jyothsna V., Prasad V.V.R. A Review of Anomaly Based Intrusion Detection Systems. *International Journal of Computer Applications*. 2011. vol. 28, no. 7. pp. 26–35.
8. Baddar S.A.-H., Merlo A., Migliardi M. Anomaly Detection in Computer Networks: A State-of-the-Art Review. *Journal of Wireless Mobile Networks, Ubiquitous Computing, and Dependable Applications*. 2014. vol. 5, no. 4. pp. 29–64.
9. Gyanchandani M., Rana J.L., Yadav R.N. Taxonomy of Anomaly Based Intrusion Detection System: A Review. *International Journal of Scientific and Research Publications*. 2012. vol. 2, Issue 12. pp. 1–13.
10. Tsai C.F., Hsub Y.F., Linc C.Y., Lin W.Y. Intrusion detection by machine learning: A review. *Expert Systems with Applications*. 2009. vol. 36, Issue 10. pp. 11994–12000.
11. Wu S.X., Banzhaf W. The Use of Computational Intelligence in Intrusion Detection Systems: A Review. *Applied Soft Computing*, 2010, vol. 10, Issue 1. pp. 1–35.
12. Kabiri P., Ghorbani A.A. Research on Intrusion Detection and Response: A Survey. *International Journal of Network Security*. 2005. vol. 1, no. 2. pp. 84–102.
13. Debar H., Dacier M., Wespri A. Towards a taxonomy of intrusion-detection systems. *Computer Networks*. 1999. vol. 31, Issue 8. pp. 805–822.
14. Barford P., Plonka D. Characteristics of Network Traffic Flow Anomalies. Proceedings of the 1st ACM SIGCOMM Workshop on Internet Measurement. 2001. pp. 69–73.
15. Kim S.S., Reddy A.L. Statistical techniques for detecting traffic anomalies through packet header data. *IEEE/ACM TON*. 2008. vol. 16, Issue 3. pp. 562–575.
16. Barford P., Kline J., Plonka D., Ron A. A signal analysis of network traffic anomalies. Proceedings of the 2nd ACM SIGCOMM Workshop on Internet measurement. 2002. pp. 71–82.
17. Brindasri S., Saravanan K. Evaluation Of Network Intrusion Detection Using Markov Chain. *International Journal on Cybernetics & Informatics (IJCI)*. 2014. vol. 3, no. 2. pp. 11–20.
18. Ye N., Chen Q. An Anomaly Detection Technique Based on a Chi-square Statistic for Detecting Intrusions into Information Systems. *Quality and Reliability Engineering International*. 2001. vol. 17, Issue 2. pp. 105–112.
19. Brockwell P.J., Davis R.A. Introduction to Time Series and Forecasting. Springer Science & Business Media. 2006. 434 p.
20. Lee W., Xiang D. Information-theoretic measures for anomaly detection. *Security and Privacy*. 2001. pp. 130–143.
21. Gu Y., McCallum A., Towsley D. Detecting Anomalies in Network Traffic Using Maximum Entropy Estimation. Proceedings of the 5th ACM SIGCOMM conference on Internet Measurement. 2005. pp. 32–32.
22. Babaie T., Chawla S., Ardon S. Network Traffic Decomposition for Anomaly Detection. Available at: <http://arxiv.org/pdf/1403.0157.pdf>, 2014 (accessed: 08.03.2016).

23. Krylov V.V., Samokhvalova V.V. *Teoriya teletrafika i ee prilozheniya* [Teletraffic Theory and Its Applications]. SPb.: BHV-Petersburg. 2005. 288 p. (In Russ.).
24. Mazurek M., Dymora P. Network anomaly detection based on the statistical self-similarity factor for HTTP protocol. *Przeglad elektrotechniczny*. 2014. pp. 127–130.
25. Lee K., Kim J., Kwon K.H., Han Y., Kim S. DDoS attack detection method using cluster analysis. *Expert Systems with Applications*. 2008. vol. 34. Issue 3. pp. 1659–1665.
26. Snort. Open Source Intrusion Detection System. Available at: <https://www.snort.org/> (accessed: 22.03.2016).
27. Suricata. Open Source IDS/IPS/NSM engine. Available at: <http://suricata-ids.org/> (accessed: 22.03.2016).
28. Ilgun K., Kemmerer R.A., Porras P.A. State Transition Analysis: A Rule-Based Intrusion Detection Approach. *IEEE Transactions on Software Engineering*. 1995. vol. 21. Issue 3. pp. 181–199.
29. Kumar S., Spafford E.H. A software architecture to support misuse intrusion detection. Proceedings of the 18th National Information Security Conference. 1995. pp. 194–204.
30. Zhu W., Zhou Q., Li P. Intrusion detection based on model checking timed interval temporal logic. IEEE International Conference on Information Theory and Information Security (ICITIS). 2010. pp. 503–505.
31. Kruegel C., Toth T. Using Decision Trees to Improve Signature-Based Intrusion Detection. *Recent Advances in Intrusion Detection*. 2003. pp. 173–191.
32. DARPA Intrusion Detection Data Sets. Available at: <https://www.ll.mit.edu/ideval/data/> (accessed: 22.03.2016).
33. Heckerman D. A Tutorial on Learning with Bayesian Networks. *Innovations in Bayesian Networks: Theory and Applications*. 2008. vol. 156. pp. 33–82.
34. Barbara D., Wu N., Jajodia S. Detecting Novel Network Intrusions Using Bayes Estimators. Proceedings of the First SIAM International Conference on Data Mining. 2001. pp. 1–17.
35. Mukkamala S., Sung A.H., Abraham A., Ramos V. Intrusion Detection Systems Using Adaptive Regression Splines. Sixth International Conference on Enterprise Information Systems. 2006. pp. 211–218.
36. Ranjan R., Sahoo G. A new clustering approach for anomaly intrusion detection. *International Journal of Data Mining & Knowledge Management Process (IJDKP)*. 2014. vol. 4. no. 2. pp. 29–38.
37. Guan Y., Ghorbani A.A., Belacel N. Y-means: a clustering method for intrusion detection. Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, 2003. vol. 2. pp. 1083–1086.
38. Wang Y. A multinomial logistic regression modeling approach for anomaly intrusion detection. *Computers & Security*. 2005. vol. 24. Issue 8. pp. 662–674.
39. Sammany M., Sharawi M., El-Beltagy M., Saroit I. Artificial Neural Networks Architecture for Intrusion Detection Systems and Classification of Attacks. The 5th international conference INFO2007. 2007. pp. 24–26.
40. Moradi M., Zulkernine M. A Neural Network Based System for Intrusion Detection and Classification of Attacks. Proceedings of the IEEE International Conference on Advances in Intelligent Systems-Theory and Applications. 2004.
41. Selim S., Hashem M., Nazmy T.M. Intrusion Detection using Multi-Stage Neural Network. *International Journal of Computer Science and Information Security (IJCSIS)*. 2010. vol. 8. no. 4. pp. 14–20.
42. Cannady J. Artificial Neural Networks for Misuse Detection. Proceedings of the 21st National Information Systems Security Conference. 1998. pp. 368–381.
43. Ryan J., Lin M.J. Intrusion Detection with Neural Networks. *Advances in Neural Information Processing Systems*. 1998. pp. 943–949.

44. Tan K. The Application of Neural Networks to UNIX Computer Security. Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks. 1995. vol. 1. pp. 476–481.
45. Sheth H., Shah B., Yagnik S. A survey on RBF Neural Network for Intrusion Detection System. *Int. Journal of Engineering Research and Applications*. 2014. vol. 4. Issue 12. pp. 17–22.
46. Gnosh A.K., Michael C., Schatz M. A Real-Time Intrusion Detection System Based on Learning Program Behavior. Proceedings of the 3rd International Workshop on Recent Advances in Intrusion Detection (RAID '00). 2000. vol. 1907. pp. 93–109.
47. Høglund A.J., Hatonen K., Sorvari A.S. A Computer Host-Based User Anomaly Detection System Using The Self-Organizing Map. Proceedings of the IEEE-INNS-ENNS International Joint Conference on Neural Networks. 2000. vol. 5. pp. 411–416.
48. Wang W., Guan X., Zhang X., Yang L. Profiling program behavior for anomaly intrusion detection based on the transition and frequency property of computer audit data. *Computers & Security*. 2006. vol. 25. Issue 7. pp. 539–550.
49. Bivens A., Palagiri C., Smith R., Szymanski B., Embrechts M. Network-Based Intrusion Detection Using Neural Networks. *Intelligent Engineering Systems through Artificial Neural Networks*. 2002. vol. 12. pp. 579–584.
50. Cannady J., Mahaffey J. The Application of Artificial Neural Networks to Misuse Detection: Initial Results. Proceedings of the 1st International Workshop on Recent Advances in Intrusion Detection. 1998.
51. Jirapummin C., Wattanapongsakorn N., Kanthamanon P. Hybrid Neural Networks for Intrusion Detection System. Proceedings of the 2002 International Technical Conference on Circuits, Systems, Computers and Communications. 2002. vol. 7. pp. 928–931.
52. Horeis T. Intrusion detection with neural networks – combination of self-organizing maps and radial basis function networks for human expert integration. Available at: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.106.191&rep=rep1&type=pdf>. 2003. (accessed: 22.03.2016).
53. Pawar S.N. Intrusion Detection in Computer Network using Genetic Algorithm Approach: A Survey. *International Journal of Advances in Engineering & Technology*. 2013. vol. 6. Issue 2. pp. 730–736.
54. Lu W., Traore I. Detecting New Forms of Network Intrusion Using Genetic Programming. *Computational intelligence*. 2004. vol. 20. no 3. pp. 475–494.
55. Jiang H., Ruan J. The Application of Genetic Neural Network in Network Intrusion Detection. *Journal of computers*. 2009. vol. 4. no. 12. pp. 1223–1230.
56. Ireland E. Intrusion Detection with Genetic Algorithms and Fuzzy Logic. UMM CSci senior seminar conference. 2013. pp. 1–6.
57. Li W. Using Genetic Algorithm for Network Intrusion Detection. Proceedings of the United States Department of Energy Cyber Security Group. 2004. pp. 1–8.
58. Sinclair C., Pierce L., Matzner S. An Application of Machine Learning to Network Intrusion Detection. Proceedings of the 15th Annual Computer Security Applications Conference. 1999. pp. 371–378.
59. Dave M.H., Sharma S.D. Improved Algorithm for Intrusion Detection Using Genetic Algorithm and SNORT. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*. 2014. pp. 273–276.
60. KDD Cup 1999 Data. Available at: <http://kdd.ics.uci.edu/databases/kddcup99/kddcup99.html> (accessed: 22.03.2016).
61. Wilson D., Kaur D. Using Grammatical Evolution for Evolving Intrusion Detection Rules. Proceedings of the 5th WSEAS Int. Conf. on Circuits, Systems, Electronics, Control & Signal Processing. 2006. pp. 42–47.
62. De Castro L.N., Von Zuben F.J. Artificial Immune Systems: Part I - Basic Theory and Applications. Universidade Estadual de Campinas, Dezembro de, Technical Report, 1999. 95 p.

63. Jerne N. Towards a network theory of the immune system. *Ann. Immunol. (Inst. Pasteur)*. 1974. pp. 373–389.
64. Dasgupta D. Advances in Artificial Immune Systems. *IEEE computational intelligence magazine*. 2006. vol. 1. Issue 4. pp. 40–49.
65. Forrest S., Perelson A.S., Allen L., Cherukuri R. Self-Nonself Discrimination in a Computer. Proceedings of IEEE symposium on research in security and privacy. 1994. pp. 202–212.
66. Kim J., Bentley P.J. The Artificial Immune System for Network Intrusion Detection: An Investigation of Clonal Selection with a Negative Selection Operator. Proceedings of the Congress on Evolutionary Computation. 2001. pp. 1244–1252.
67. Seredinski F., Bourvry P. Anomaly detection in TCP/IP networks using immune systems paradigm. *Computer communications*. 2007. vol. 30. pp. 740–749.
68. Hofmeyr S.A., Forrest S. Architecture for an Artificial Immune System. *Journal of Evolutionary Computation*. 2000. vol. 8. no. 4. pp. 443–473.
69. Hofmeyr S.A. An Immunological Model of Distributed Detection and its Application to Computer Security. PhD thesis. Department of Computer Sciences, University of New Mexico. 1999. 113 p.
70. Powers S.T., He J. A Hybrid Artificial Immune System and Self Organising Map for Network Intrusion Detection. *Information Sciences*. 2008. vol. 178. Issue 15. pp. 3024–3042.
71. Zhou Y.P. Hybrid Model Based on Artificial Immune System and PCA Neural Networks for Intrusion Detection. Asia-Pacific Conference on Information Processing. 2009. vol. 1. pp. 21–24.
72. Chen W.H., Hsu S.H., Shen H.P. Application of SVM and ANN for intrusion detection. *Computers & Operations Research*. 2005. vol. 32. Issue 10. pp. 2617–2634.
73. Rozenberg G., Bäck T., Kok J.N. Handbook of natural computing. Springer Publishing Company, Incorporated. 2011. 2104 p.
74. Branitskiy A., Kotenko I. Network attack detection based on combination of neural, immune and neuro-fuzzy classifiers. The 18th IEEE International Conference on Computational Science and Engineering (IEEE CSE2015). 2015. pp. 152–159.
75. Peddabachigari S., Abraham A., Grosan C., Thomas J. Modeling intrusion detection system using hybrid intelligent systems. *Journal of Network and Computer Applications*. 2007. vol. 30. Issue 1. pp. 114–132.
76. Abraham A., Thomas J. Distributed intrusion detection systems: a computational intelligence approach. *Applications of Information Systems to Homeland Security and Defense*. 2005. pp. 105–135.
77. Mukkamala S., Sung A.H., Abraham A. Intrusion detection using ensemble of soft computing paradigms. *Intelligent systems design and applications*. 2003. vol. 23. pp. 239–248.
78. Vaitsekhovich L. Intrusion Detection in TCP/IP Networks Using Immune Systems Paradigm and Neural Network Detectors. XI International PhD Workshop OWD. 2009. pp. 219–224.
79. Komar M., Golovko V., Sachenko A., Bezobrazov S. Development of Neural Network Immune Detectors for Computer Attacks Recognition and Classification. IEEE 7th Intern. Conf. on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS). 2013. vol. 2. pp. 665–668.
80. Golovko V., Komar M., Sachenko A. Principles of Neural Network Artificial Immune System Design to Detect Attacks on Computers. Intern. Conf. on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET). 2010. p. 237.

81. Govindarajan M., Chandrasekaran R.M. Intrusion Detection Using an Ensemble of Classification Methods. Proc. of the World Congress on Engineering and Computer Science. 2012. vol. 1. pp. 459–464.
82. Mukkamala S., Sung A.H., Abraham A. Intrusion Detection Using an Ensemble of Intelligent Paradigms. *Journal of Network and Computer Applications*. 2005. vol. 28. Issue 2. pp. 167–182.
83. Toosi A.N., Kahani M. A New Approach to Intrusion Detection Based on an Evolutionary Soft Computing Model Using Neuro-Fuzzy Classifiers. *Computer Communications*. 2007. vol. 30. Issue 10. pp. 2201–2212.
84. Sommer R., Paxson V. Outside the Closed World: On Using Machine Learning For Network Intrusion Detection. IEEE Symposium on Security and Privacy (SP). 2010. pp. 305–316.
85. Chan-Tin E., Feldman D., Hopper N., Kim Y. The Frog-Boiling Attack: Limitations of Anomaly Detection for Secure Network Coordinate Systems. *Security and Privacy in Communication Networks*. Springer Berlin Heidelberg. 2009. pp. 448–458.
86. Kotenko I.V., Karsayev O.I. [Using the multi-agent technology for comprehensive protection of information in computer networks]. *Izvestija TRTU – News TSURE*. 2001. no. 4. pp. 38–50. (In Russ.).
87. Gorodetsky V., Kotenko I., Karsayev O. The Multi-agent Technologies for Computer Network Security: Attack Simulation, Intrusion Detection and Intrusion Detection Learning. *The International Journal of Computer Systems Science & Engineering*. 2003. no. 4. pp. 191–200.
88. Kotenko I.V. [Multi-agent technology for the analysis of vulnerabilities and intrusion detection in computer networks]. *Novosti iskusstvennogo intellekta – News of artificial intelligence*. 2004. no. 1. pp. 56–72. (In Russ.).
89. Kotenko I.V., Vorontsov V.V., Chechulin A.A., Ulanov A.V. [Proactive security mechanisms against network worms: approach, implementation and results of the experiments]. *Informacionnye tehnologii – Information Technology*. 2009. no. 1. pp. 37–42. (In Russ.).
90. Kotenko I.V., Netsteruk P.G., Chechulin A.A. [Combining scanning detection mechanisms in computer networks]. *Voprosy zashhity informacii – The protection of information*. 2011. no. 3. pp. 30–34. (In Russ.).
91. Komashinskiy D., Kotenko I. Malware Detection by Data Mining Techniques Based on Positionally Dependent Features. Proceedings of the 18th Euromicro International Conference on Parallel, Distributed and network-based Processing (PDP 2010). 2010. pp. 617–623.
92. Komashinskiy D.V., Kotenko I.V. [Detection of malicious PDF documents on the basis of data mining]. *Problemy informacionnoj bezopasnosti. Komp'yuternye sistemy – Problems of information security. Computer systems*. 2012. no. 1. pp. 19–35. (In Russ.).
93. Branitskiy A.A., Kotenko I.V. [Construction of neural network and immunokletochnoy intrusion detection system]. *Problemy informacionnoj bezopasnosti. Komp'yuternye sistemy – Problems of information security. Computer systems*. 2015. no. 4. pp. 23–27. (In Russ.).
94. Branitskiy A.A., Kotenko I.V. [Hacker attack detection based on aggregation of neural, immune and neuro-fuzzy classifiers]. *Informacionno-upravljajushhie sistemy – Information and Control Systems*. 2015. vol. 4. pp. 69–77. (In Russ.).
95. Kotenko I.V., Saenko I.B. [To a new generation of security monitoring and control systems]. *Vestnik Rossijskoj akademii nauk – Bulletin of the Russian Academy of Sciences*. 2014. vol. 84. no. 11. pp. 993–1001. (In Russ.).

Браницкий Александр Александрович — младший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН). Область научных

интересов: безопасность компьютерных сетей, искусственный интеллект, функциональное программирование. Число научных публикаций — 11. branitskiy@comsec.spb.ru, <http://www.comsec.spb.ru>; 14-я линия В.О., д. 39, Санкт-Петербург, 199178; р.т.: +7(812)328–7181, Факс: +7(812)328–4450.

Branitskiy Alexander Alexanderovich — junior researcher, laboratory of Computer Security Problems of the St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Science (SPIIRAS). Research interests: security of computer networks, artificial intelligence, functional programming. The number of publications — 11. branitskiy@comsec.spb.ru, <http://www.comsec.spb.ru>; 39, 14-th Line V.O., St. Petersburg, 199178, Russia; office phone: +7(812)328–7181, Fax: +7(812)328–4450.

Котенко Игорь Витальевич — д-р техн. наук, профессор, заведующий лабораторией проблем компьютерной безопасности, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН). Область научных интересов: безопасность компьютерных сетей, в том числе управление политиками безопасности, разграничение доступа, аутентификация, анализ защищенности, обнаружение компьютерных атак, межсетевые экраны, защита от вирусов и сетевых червей, анализ и верификация протоколов безопасности и систем защиты информации, защита программного обеспечения от взлома и управление цифровыми правами, технологии моделирования и визуализации для противодействия кибер-терроризму. Число научных публикаций — 450. ivkote@comsec.spb.ru, <http://www.comsec.spb.ru>; 14-я линия В.О., д. 39, Санкт-Петербург, 199178; р.т.: +7(812)328–2642, Факс: +7(812)328–4450.

Kotenko Igor Vitalievich — Ph.D., Dr. Sci., professor, head of computer security problems Laboratory, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of Russian Academy of Sciences (SPIIRAS). Research interests: computer network security, including security policy management, access control, authentication, network security analysis, intrusion detection, firewalls, deception systems, malware protection, verification of security systems, digital right management, modeling, simulation and visualization technologies for counteraction to cyber terrorism. The number of publications — 450. ivkote@comsec.spb.ru, <http://www.comsec.spb.ru>; 39, 14-th Line V.O., St. Petersburg, 199178, Russia; office phone: +7(812)328–2642, Fax: +7(812)328–4450.

Поддержка исследований. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты №14-07-00697, 14-07-00417, 15-07-07451, 16-37-00338, 16-29-09482 офи_м), при частичной поддержке бюджетных тем № 0073-2015-0004 и 0073-2015-0007, а также гранта РНФ 15-11-30029 в СПИИРАН.

Acknowledgements. This research is supported by RFBR (projects No. 14-07-00697, 14-07-00417, 15-07-07451, 16-37-00338, 16-29-09482), in part by the budget (projects No. 0073-2015-0004 and 0073-2015-0007) and by the grant of RSF 15-11-30029 in SPIIRAS.

РЕФЕРАТ

Браницкий А.А., Котенко И.В. **Анализ и классификация методов обнаружения сетевых атак.**

Стремительное развитие компьютерных сетей и информационных технологий вызывает ряд проблем, связанных с безопасностью сетевых ресурсов, которые требуют новых подходов. В настоящее время вопросы построения систем обнаружения атак представляют собой актуальное направление в области сетевых технологий.

В работе проводится анализ известных методов для обнаружения и классификации сетевых атак, предлагается обобщенная схема классификации этих методов.

Дается анализ поведенческих методов, методов на основе знаний, методов машинного обучения и вычислительного интеллекта. Рассматриваются также работы, в которых представлены гибридные решения по комбинированию отдельных решателей.

SUMMARY

Branitskiy A.A., Kotenko I.V. **Analysis and Classification of Methods for Network Attack Detection.**

The rapid development of computer networks and information technologies raises a number of issues related to the security of network resources, which require new approaches. Currently, the problems of constructing attack detection systems represent the relevant trend in the field of network technologies.

We examine the known methods for detection and classification of network attacks and propose the generalized classification scheme of these methods.

The analysis of behavioral methods, knowledge-based methods, methods of machine learning and computational intelligence is given. We also consider the papers which contain hybrid solutions of combining the individual classifiers.

РУКОВОДСТВО ДЛЯ АВТОРОВ

Взаимодействие автора с редакцией осуществляется через личный кабинет на сайте журнала «Труды СПИИРАН» <http://www.proceedings.spiiras.nw.ru>. При регистрации авторам рекомендуется заполнить все предложенные поля данных, так как это значительно ускорит процесс оформления метаданных к новым статьям.

Подготовка статьи ведется с помощью текстовых редакторов MS Word 2007 и выше. Объем основного текста – от 5 до 20 страниц включительно. Формат страницы документа – А5 (148 мм ширина, 210 мм высота); ориентация – портретная; все поля – 20 мм. Верхний и нижний колонтитулы страницы – пустые. Основной шрифт документа – Times New Roman, основной кегль (размер) шрифта – 10 pt. Переносы разрешены. Абзацный отступ устанавливается размером в 10 мм. Межстрочный интервал – одинарный. Номера страниц не проставляются.

Не допускается использования цветных шрифтов, цветовых выделений и цветных рисунков. Статьи должны быть полностью готовы к черно-белой печати.

Основная часть текста статьи разбивается на разделы, среди которых являются обязательными: введение, хотя бы один «содержательный» раздел и заключение. Допускается также мотивированное содержанием и структурой материала выделение подразделов.

В основную часть допускается помещать рисунки, таблицы, листинги и формулы. Правила их оформления подробно рассмотрены на нашем сайте в разделе «Руководство для авторов».

