

ISSN 2500—0381

Электронная версия

ISSN 0021—3454

Печатная версия

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

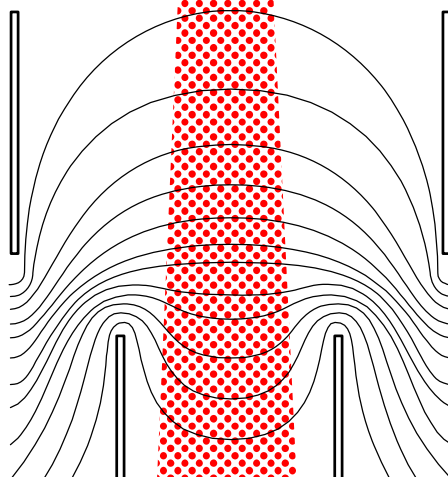
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ



№ 9

Т. 65
2022

Journal of Instrument Engineering



ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

проф. А. А. БОБЦОВ

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

А. П. АЛЕШКИН, д-р техн. наук, проф., ВКА им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия
А. В. БЕЛИКОВ, д-р техн. наук, проф., Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
И. А. БЕССМЕРТНЫЙ, д-р техн. наук, проф., Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
В. А. БОГАТЫРЕВ, д-р техн. наук, проф., Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
Д. В. ЕФАНОВ, д-р техн. наук, проф., СПбПУ, Санкт-Петербург, Россия
А. КЛИМЧИК, PhD, доцент, Университет Иннополис, Иннополис, Россия
С. А. КОЛЮБИН, д-р техн. наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
И. А. КОНЯХИН, д-р техн. наук, проф., Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
В. В. КРИШТОП, д-р физ.-мат. наук, проф., ПНИПУ, Пермь, Россия
Л. С. ЛИСИЦЫНА, д-р техн. наук, проф., Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
В. Д. ЛУКЪЯНОВ, д-р физ.-мат. наук, проф., ОАО „Авангард“, Санкт-Петербург, Россия
А. В. ЛЯМИН, д-р техн. наук, доцент, СПбПУ, Санкт-Петербург, Россия
А. В. МАЛОЛЕТОВ, д-р физ.-мат. наук, проф., Университет Иннополис, Иннополис, Россия
Ю. Н. МАТВЕЕВ, д-р техн. наук, ООО „ЦРТ-инновации“, Санкт-Петербург, Россия
В. М. МЕДУНЕЦКИЙ, д-р техн. наук, проф., ООО „Феррум“, Санкт-Петербург, Россия
В. М. МУСАЛИМОВ, д-р техн. наук, проф., Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
А. А. ОЖИГАНОВ, д-р техн. наук, проф., АО «НИТИ „Авангард“», Санкт-Петербург, Россия
А. А. ПЫРКИН (зам. главного редактора), д-р техн. наук, проф., Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
Б. В. СОКОЛОВ, д-р техн. наук, проф., СПбФИЦ РАН, Санкт-Петербург, Россия
С. В. СОЛК, д-р техн. наук, НИИ ОЭП, Сосновый Бор, Ленинградская обл., Россия
Д. В. ТИТОВ, д-р техн. наук, доцент, ЮЗГУ, Курск, Россия
А. В. ФЕДОРОВ, д-р техн. наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
Н. Б. ФИЛИМОНОВ (зам. главного редактора), д-р техн. наук, проф., МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия
И. Б. ФУРТАТ, д-р техн. наук, доцент, ИПМаш РАН, Санкт-Петербург, Россия

Ответственный секретарь *М. В. Лебецкая*

Редактор *И. М. Игошина*

Набор, верстка: *М. В. Герасимова*

Перевод: *Ю. И. Копилевич*

Адрес: 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, лит. А, Университет ИТМО

Телефон: (812) 480-02-73, E-mail: pribor@itmo.ru

[http:// pribor.ifmo.ru/](http://pribor.ifmo.ru/)

Подписано в печать 28.09.2022 г.

Отпечатано в учреждении „Университетские телекоммуникации“

Адрес: 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, лит. А

Телефон: (812) 915-14-54, E-mail: Prudentov@tibir.ru

Редколлегия просит авторов и рецензентов отнестись с пониманием к ужесточению требований к рукописям и изменению формы подачи материала в журнале.

Аннотация объемом 150—250 слов должна отражать содержание статьи: предмет исследования, цель работы, метод проведения работы, краткое описание экспериментальных или теоретических исследований, полученные результаты и рекомендации по их применению.

Ключевые слова, служащие идентификаторами при предметном поиске, должны однозначно отражать содержание статьи. Основное ключевое слово/словосочетание указывается первым, общее количество ключевых слов — не менее 5.

Список литературы: для обзорной статьи рекомендуется приводить не менее 50 источников, для полнотекстовой статьи — не менее 15, для краткого сообщения — не менее 8 (при составлении списка преимущество следует отдавать изданиям, включенным в международные базы цитирования Scopus и Web of Science).

Новые требования к оформлению рукописи размещены на сайте журнала <http://pribor.itmo.ru/>



Адрес: 197101, Санкт-Петербург,
Кронверкский пр., 49, лит. А, Университет ИТМО
Телефон: (812) 480-02-73
[http:// pribor.ifmo.ru/](http://pribor.ifmo.ru/)
E-mail: pribor@itmo.ru

Журнал публикует научные обзоры, полнотекстовые статьи и краткие сообщения, отражающие результаты практических и теоретических исследований в области приборостроения.

Журнал содержит следующие разделы: информационные технологии и системы, приборы и системы автоматического управления, вычислительная техника, приборы навигации, элементы и устройства вычислительной техники и систем управления, оптические и оптико-электронные приборы и системы, акустические приборы и системы, приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий, приборы, системы и изделия медицинского назначения, технология приборостроения, научные и практические разработки. По договоренности с Редакцией может быть опубликован специальный тематический выпуск, посвященный достаточно узкой проблеме приборостроения.

Рукопись подается по электронной почте: pribor@itmo.ru. Редакция принимает рукопись к рецензированию при условии получения полного комплекта документов, включающего:

- экспертное заключение о возможности опубликования в открытой печати (формат PDF);
- файлы рукописи статьи, оформленные в соответствии с требованиями журнала;
- сведения об авторах, заполненные по шаблону (на русском и английском языке);
- договор о передаче авторских прав.

Рукопись должна содержать:

- название статьи (на русском и английском языке), индекс УДК;
- аннотацию (150—250 слов, на русском и английском языке), ключевые слова (не менее 5 и не более 25, на русском и английском языке), основной текст, список литературы;
- рисунки: каждый на отдельном листе формата А4 (не заверстывать в текст), таблицы.

Объем текста (оформленного в соответствии с требованиями журнала — шрифт Times New Roman, размер — 14 пт, межстрочный интервал 1,5, поля — сверху и слева 25 мм, снизу 20 мм, справа 10 мм) должен составлять 10—20 страниц, краткого сообщения — 3—5. Объем обзора предварительно согласовывается с Редакцией.

Список литературы (рекомендуется): для обзорной статьи — не менее 50, для полнотекстовой статьи — не менее 15, для краткого сообщения — не менее 8 литературных источников (не менее половины из них должны представлять собой ссылки на издания, включенные в международные базы цитирования Scopus и Web of Science). Список литературы должен формироваться в порядке появления ссылок в тексте.

Не допускается выравнивание с помощью пробелов, табуляций и символов конца абзаца. Эти символы при необходимости могут вставляться не более одного раза подряд (**не переносить с помощью дефисов**).

Формулы и отдельные символы набираются с использованием редактора формул MathType (Microsoft Equation). **Не вставлять** формулы из пакетов MathCad и MatLab. Размер шрифта в формулах — по умолчанию. Все переменные набираются курсивом, греческие буквы — прямым шрифтом, полужирные символы в формуле — стилем „матрица вектор“, русские символы — стилем „текст“, векторы следует набирать полужирным шрифтом без стрелок.

Рисунки выполняются в градациях серого в одном из форматов приложений Microsoft (Word, Excel, PowerPoint), предпочтителен векторный формат. Кривые на графиках следует помечать цифрами (1, 2, 3 и т.д.) или/и задавать линиями разного стиля (пунктир, штрихпунктир, жирная); толщина осей должна быть не менее 0,5 пт, иначе качество печати не гарантируется.

Плата за публикацию не взимается.

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

- Шелест М. Н., Татарникова Т. М. Метод оценивания быстродействия больших информационных систем с кластеризацией транзакций.....623
- Есиков О. В., Титов Д. В. Применение методов фрактального анализа изображений при решении задач оценки экологической обстановки и распознавания объектов ...630
- Копейка Е. А., Копейка А. Л., Барановский А. М. Модель оценивания готовности сложных технических систем с учетом метрологических характеристик средств контроля640
- Салихов М. Р., Юрьева Р. А. Алгоритм прогнозирования состояния оборудования на основе машинного обучения648

ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

- Филаретов В. Ф., Кацулин А. А. Согласованная работа двух мобильных роботов при автоматическом выполнении операций в сложной окружающей обстановке.....656

ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ И НАДЕЖНОСТЬ ПРИБОРОВ И СИСТЕМ

- Ходунков В. П., Заричняк Ю. П. Перспективные методы измерения теплопроводности твердых тел.....668

НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

- Алешкин А. П., Савочкин П. В., Честных А. В., Балакирев С. Н. Модель пространственно-временного синтеза объединенной функции раскрытия разнесенных антенных решеток677
- Зайцев В. В. Расчет длительности наблюдения при радиолокационной съемке685

EDITOR-IN-CHIEF

*Dr. Sci., Prof. ALEXEY BOBTSOV,
ITMO University, St. Petersburg, Russia*

EDITORIAL BOARD

ALESHKIN ANDREY, Dr. Sci., Prof., A. F. Mozhaisky Military Space Academy, St. Petersburg, Russia
BELIKOV ANDREY, Dr. Sci., Prof., ITMO University, St. Petersburg, Russia
BESSMERTNY IGOR, Dr. Sci., Prof., ITMO University, St. Petersburg, Russia
BOGATYREV VLADIMIR, Dr. Sci., Prof., ITMO University, St. Petersburg, Russia
EFANOV DMITRY, Dr. Sci., Prof., SPbPU, St. Petersburg, Russia
KLIMCHIK ALEXANDER, PhD, Ass. Prof., Innopolis University, Innopolis, Russia
KOLYUBIN SERGEY, Dr. Sci., Ass. Prof., ITMO University, St. Petersburg, Russia
KONYAKHIN IGOR, Dr. Sci., Prof., ITMO University, St. Petersburg, Russia
KRISHTOP VIKTOR, Dr. Sci., Prof., PNRPU, Perm, Russia
LISITSYNA LYUBOV, Dr. Sci., Prof., ITMO University, St. Petersburg, Russia
LUKYANOV VALERY, Dr. Sci., Prof., Avangard JSC, St. Petersburg, Russia
LYAMIN ANDREY, Dr. Sci., Ass. Prof., SPbPU, St. Petersburg, Russia
MALOLET OV ALEXANDER, Dr. Sci., Prof., Innopolis University, Innopolis, Russia
MATVEEV YURIY, Dr. Sci., Speech Technology Center, St. Petersburg, Russia
MEDUNETSKY VIKTOR., Dr. Sci., Prof., Ferrum LLC, St. Petersburg, Russia
MUSALIMOV VIKTOR, Dr. Sci., Prof., ITMO University, St. Petersburg, Russia
OZHIGANOV ALEXANDER, Dr. Sci., Prof., SRTI Avangard JSC, St. Petersburg, Russia
PYRKIN ANTON, Dr. Sci., Prof., Deputy Editor-in-Chief, ITMO University, St. Petersburg, Russia
SOKOLOV BORIS, Dr. Sci., Prof., SPbFRC RAS, St. Petersburg, Russia
SOLK SERGEY, Dr. Sci., Research Institute of Optoelectronic Instrumentation, Sosnovy Bor, Leningrad region, Russia
TITOV DMITRY, Dr. Sci., Ass. Prof., SWSU, Kursk, Russia
FEDOROV ALEXEY, Dr. Sci., Ass. Prof., ITMO University, St. Petersburg, Russia
FILIMONOV NIKOLAY, Dr. Sci., Prof., Deputy Editor-in-Chief, M. V. Lomonosov MSU, Moscow, Russia
FURTAT IGOR, Dr. Sci., Ass. Prof., Institute for Problems in Mechanical Engineering of the RAS, St. Petersburg, Russia

Executive secretary Marina V. Lebedskaya

Editor Irina M. Igoshina

Page-proof, makeup Maria V. Gerasimova

Translation of Yuriy I. Kopilevich

Address: ITMO University, Kronverksky pr. 49, bldg. A, St. Petersburg, Russia, 197101

Tel: (812) 480-02-73

Site: pribor.ifmo.ru

E-mail: pribor@itmo.ru

THE MINISTRY OF SCIENCE AND HIGHER EDUCATION OF THE RUSSIAN FEDERATION

JOURNAL OF INSTRUMENT ENGINEERING

ITMO UNIVERSITY

The Journal is published since January 1958

Vol. 65

SEPTEMBER 2022

№ 9

CONTENTS

INFORMATION TECHNOLOGIES AND SYSTEMS, COMPUTER TECHNIQUE

- Shelest M. N., Tatarnikova T. M.** Method for Estimating the Performance of Large Information Systems with Transaction Clustering623
- Esikov O. V., Titov D. V.** Application of Methods of Fractal Images Analysis in Solving Environmental Assessment and Object Recognition Problems630
- Kopeyka E. A., Kopeyka A. L., Baranovsky A. M.** Model for Assessing the Readiness of Complex Technical Systems Taking into Account the Metrological Characteristics of Control Tools640
- Salikhov M. R., Yurieva R. A.** Algorithm for Predicting the State of Equipment Based on Machine Learning.....648

DEVICES AND SYSTEMS OF AUTOMATIC CONTROL

- Filaretov V. F., Katsurin A. A.** Coordinated Work of Two Mobile Robots when Performing Operations Automatically in a Complex Environment656

HEAT REGIMES AND RELIABILITY OF INSTRUMENTS AND SYSTEMS

- Khodunkov V. P., Zarichnyak Yu. P.** Promising Methods for Measuring the Thermal Conductivity of Solids668

SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

- Aleshkin A. P., Savochkin P. V., Chestnykh A. V., Balakirev S. N.** Model of Spatial-Temporal Synthesis of the Combined Aperture Function of Spaced Antenna Arrays677
- Zaytsev V. V.** Calculation of Observation Persistence During Radar Survey685

To the Authors!

The Journal of Instrument Engineering publishes scientific reviews, full-text articles and short messages, reflecting the unpublished results of theoretical and practical research in the field of fundamental instrument making.

The Journal publishes articles on the following themes: information technologies and systems, devices and automatic control systems, computer engineering, gyroscopic and navigation systems, instruments of precision mechanics, electronic and electromagnetic devices, optical and optoelectronic devices and systems, thermal regimes and reliability of devices and systems, technology and instrumentation, scientific and practical development. In agreement with the Editorial Board can be published a special themed issue devoted to a fairly narrow issue of instrumentation.

The material of the article accepted in electronic form and on any media, executed in a text editor Word without formatting along with a hard copy on A4. Electronic version of the paper may be sent by E-mail: **pribor@mail.ifmo.ru**

The size of the article (in printed form) must not exceed eight pages, a short presentation of two. Size scientific review previously agreed with the Editorial Board.

Submission includes two copies of:

— the manuscript text; list of references (recommended): review article — not less than 50, for the full text of the article — no less than 15, for short messages — at least 8 of the literary source (at least half of them should be links to the editions listed in international database of citation Scopus and Web of Science); number citations consecutively as they appear in the text;

— extended abstract (150—250 words);

— keywords (not less than 5 and not more than 25);

— illustrations: each on a separate sheet of A4 (not overestimate in the text) — big, with a maximum fill;

— the recommendation of the Department (laboratory);

— information about the authors on a template (surname, name, patronymic, name of the organization in accordance with the latest edition of the Charter, the address of the organization, academic degree and title, position, e-mail address).

The article must also enclose agreement on the transfer of copyright.

The main text. The following requirements are common to good practice in the design documents.

Font — Times New Roman, size 14, line spacing 1.5, margins — top and left — 25 mm, bottom — 20 mm, right — 10 mm.

Not allowed alignment with spaces, tabs and end of a paragraph (in the layout will need to be cleared). These symbols must be inserted only when necessary, and not more than once in a row (not to carry with dashes).

Don't insert formulas from MathCad or MatLab!

Figures and tables are to be inserted after the list of references. Graphics are accepted in one of Microsoft formats (Word, Excel, and PowerPoint); vector format is preferable. Don't use color graphics; it is better to apply dotted, dash-and dot lines, etc., or mark lines with numerical symbols.

Editorial Staff

**МЕТОД ОЦЕНИВАНИЯ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ
БОЛЬШИХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ
С КЛАСТЕРИЗАЦИЕЙ ТРАНЗАКЦИЙ**

М. Н. ШЕЛЕСТ*, Т. М. ТАТАРНИКОВА

*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,
Санкт-Петербург, Россия
mshshelest@mail.ru

Аннотация. Предложен метод оценивания верхнего и нижнего граничных значений показателя быстродействия больших информационных систем с учетом соблюдения требования к целостности данных системы. Целостность обеспечивается путем блокировки необходимых для выполнения транзакции вычислительных ресурсов и их освобождения при завершении или откате транзакции. Кластеризация транзакций позволяет организовать параллельную обработку запросов пользователей, принадлежащих разным кластерам. Особенности обработки запросов не позволяют аналитически оценить быстродействие больших информационных систем, а натурный или имитационный эксперимент требует значительных временных затрат. Модель большой информационной системы формализуется в виде сети массового обслуживания. Полное множество маршрутов в сети массового обслуживания задается числом кластеров схожих транзакций. Быстродействие оценивается временем отклика системы.

Ключевые слова: транзакция, кластеризация транзакций, большая информационная система, сеть массового обслуживания, граф, быстродействие системы

Ссылка для цитирования: Шелест М. Н., Татарникова Т. М. Метод оценивания быстродействия больших информационных систем с кластеризацией транзакций // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 9. С. 623—629. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-9-623-629.

**METHOD FOR ESTIMATING THE PERFORMANCE
OF LARGE INFORMATION SYSTEMS WITH TRANSACTION CLUSTERING**

M. N. Shelest*, T. M. Tatarnikova

*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation,
St. Petersburg, Russia
mshshelest@mail.ru

Abstract. A method for estimating the upper and lower bounds of large information system performance with the account for the system data integrity requirement, is proposed. The integrity is ensured by locking the computing resources necessary for the transaction execution and releasing them when the transaction is completed or cancelled. Clustering of transactions allows for parallel processing of different user requests belonging to different clusters. The features of query processing give no way of analytical assessment of large information systems performance, and a full-scale or simulation experiment is time consuming. The model of a large information system is formalized in the form of a mass service network. The complete set of routes in the queuing network is given by the number of clusters of similar transactions. The performance is estimated by the system response time.

Keywords: transaction, transaction clustering, big information system, queuing network, graph, system performance

For citation: Shelest M. N., Tatarnikova T. M. Method for estimating the performance of large information systems with transaction clustering. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 9. P. 623—629 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-9-623-629.

Введение. В последнее время особое внимание уделяется большим информационным системам (ИС) с распределенной структурой. К таким системам относятся платформы для интернет-магазинов, портал оказания госуслуг, банковские системы и др. [1]. Запросы пользователей, как правило, представляют собой группы сильно связанных транзакций. Связанность обусловлена набором операций, составляющих транзакции [2].

Соблюдение свойств атомарности, согласованности, изолированности и устойчивости транзакций приводит к необходимости резервирования вычислительных ресурсов, которые планируются для выполнения операций [3]. Отмена блокировки ресурсов происходит при условии завершения транзакции или ее откате. Благодаря механизму резервирования обеспечивается сохранение целостности данных в системе, а возникновение взаимных блокировок при откате транзакций сводится к нулю [4].

В связи с тенденцией применения больших данных приобрели актуальность вопросы не только анализа данных, но и быстродействия больших информационных систем, обеспечивающих хранение и доступ к этим данным [5].

Оценить быстродействие больших информационных систем можно в результате проведения натурального или имитационного эксперимента в течение длительного времени. С другой стороны, используя аналитический метод, возможно определить верхние граничные значения показателя быстродействия информационной системы, что позволит заранее выявить ее потенциальные возможности при наличии требований к средней задержке отклика системы [6, 7].

В настоящей статье предлагается аналитический метод оценивания быстродействия большой информационной системы, основанный на определении граничных значений.

Модель большой информационной системы с кластеризацией транзакций. Введем модель рассматриваемого типа системы на основе сети массового обслуживания (МО). Ресурсам информационной системы соответствуют обслуживающие устройства сети, транзакциям — заявки, а процессу выполнения транзакции — прохождение заявки по маршруту внутри сети МО. Маршруты представляют собой простые цепи. Множество разрешенных маршрутов в сети — это множество типов транзакций, которое определено заранее и конечно [8].

Транзакции в сети МО задаются пересекающимися маршрутами заявок, что позволяет все множество маршрутов разбить на кластеры схожих транзакций и представить в виде графа зависимости маршрутов [9,10]. Обозначим i -ю транзакцию как T_i , $i = \overline{1, Q}$, где Q — число транзакций, принадлежащих одному кластеру. При этом сами кластеры могут оказаться слабо связанными между собой.

На рис. 1, а приведен пример графа зависимости маршрутов заявок (транзакций), на рис. 1, б — сеть массового обслуживания, соответствующая этому графу. Каждая из 16 транзакций определяется последовательностью обслуживающих устройств.

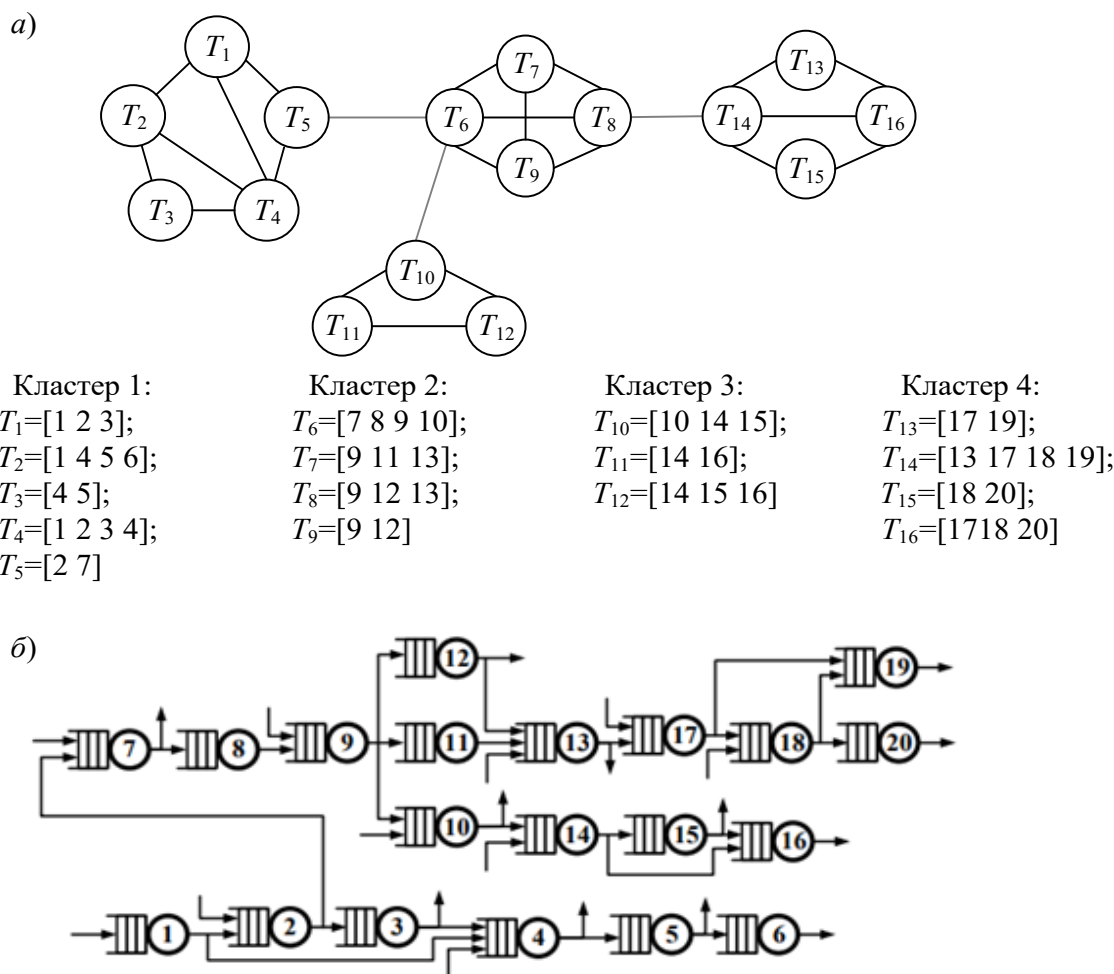


Рис. 1

Для каждого типа транзакций на входе системы установлен отдельный буфер, выполняющий функцию точки отката транзакции и одновременно диспетчера, определяющего порядок поступления заявок на обслуживание. Как только заявка поступает в этот буфер, срабатывает механизм блокировки ресурсов маршрута транзакции. Механизм блокировки обеспечивает порядок, при котором с одними и теми же ресурсами одновременно может работать только одна транзакция.

Метод определения граничных значений показателя быстродействия информационной системы. Предлагаемый метод основан на добавлении избыточных зависимостей и дублировании некоторых обслуживающих узлов при определении верхней границы показателя быстродействия большой ИС, а также удалении пересечений, играющих роль слабой связи между соседними кластерами сети МО. Использование метода позволяет записать замкнутое выражение для определения интервала среднего времени пребывания заявки в сети массового обслуживания.

Рассмотрим модель большой ИС, представленную в виде сети массового обслуживания с частым пересечением некоторых групп маршрутов. Сеть состоит из 20 элементарных систем массового обслуживания и транзакции в ней заданы набором из 16 маршрутов разной длины, как показано на рис. 1.

Первоначально может создаться впечатление, что заявки, проходящие по маршрутам из разных кластеров, зачастую могут обслуживаться параллельно. На деле же каждый такой кластер не может работать независимо от других из-за механизма блокировки ресурсов. Поступая на обслуживание, заявка блокирует все системы массового обслуживания на своем маршруте. Это приводит к тому, что и все смежные маршруты также окажутся заблокированными,

так как они имеют общие вычислительные ресурсы. А это означает, что за счет блокировки маршрутов, соединяющих соседние кластеры (т.е. связующих узлов T_5 , T_6 , T_{10} , T_8 и T_{14} для графа на рис. 1), средняя задержка в подграфах, образующих кластеры, не может быть рассчитана независимо от времени обработки заявок на подобных маршрутах.

Исходя из вышесказанного, предлагается следующий метод оценивания верхней границы среднего времени пребывания заявки в сети МО с кластеризацией маршрутов обслуживания: осуществляется дублирование связующих узлов и введение в граф зависимости маршрутов дополнительных фиктивных соединений, чтобы кластер вместе со всеми смежными связующими узлами образовал отдельный полносвязный подграф. На рис. 2 приведен пример такого преобразования графа зависимости маршрутов. На данном примере видно, что связующие узлы T_5 , T_6 , T_{10} , T_8 и T_{14} продублированы для включения в каждый связанный с ними подграф. Поскольку узел T_6 связан с тремя подграфами, то было создано еще два дубля, чтобы учесть задержку, которую данный узел оказывает на смежные подграфы. После чего полученные подграфы были дополнены связями до образования полносвязных подграфов.

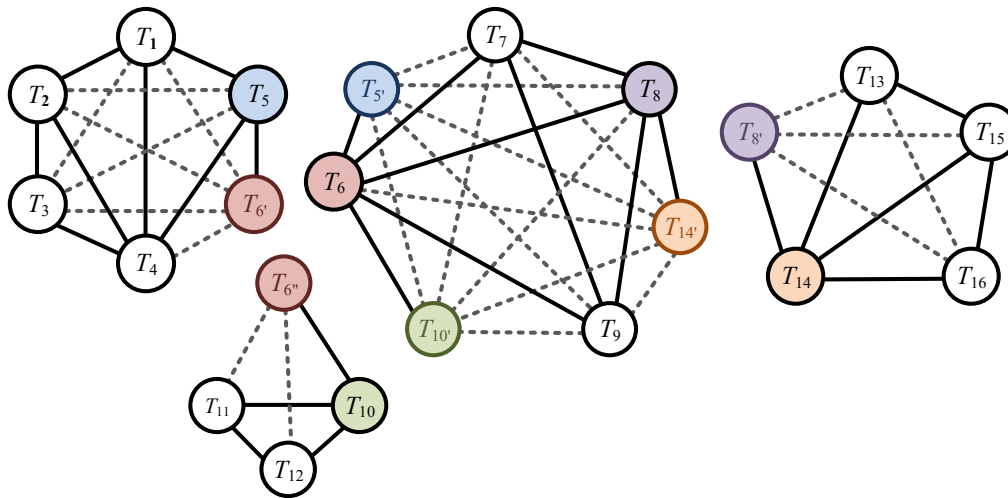


Рис. 2

Так как полученные подграфы могут независимо от других обслуживать только одну заявку, то каждый из них можно представить в виде составной системы массового обслуживания.

За счет добавления дополнительных узлов и связей среднее время выполнения транзакции будет несколько увеличено, но данное преобразование позволит вычислить среднюю задержку заявки в сети для каждого кластера. Таким образом, выражение для оценки верхней границы средней задержки для всей исходной сети МО имеет следующий вид:

$$\hat{\tau}_B = \sum_{k=1}^K P_k \left(\frac{\Lambda_k}{2} \int_0^{\infty} t^2 \varphi_k(t) dt \int_0^{\infty} \frac{\varphi_k(t) dt}{\left(1 - \Lambda_k \int_0^t x \varphi_k(x) dx \right)^2} + \frac{1}{M_k} \right),$$

где P_k — вероятность поступления заявки в k -й полносвязный подграф, Λ_k — интенсивность поступления заявок в k -й полносвязный подграф, $\varphi_k(t)$ — плотность вероятности времени обслуживания заявок в k -м полносвязном подграфе, M_k — интенсивность обслуживания заявок в k -м полносвязном подграфе.

Декомпозиция графа зависимости маршрутов для определения нижнего граничного значения показателя быстродействия большой ИС представляется очевидной. Для того чтобы разделить граф зависимости маршрутов на отдельные полносвязные подграфы, необходимо удалить ребра, соединяющие связующие узлы, как показано на рис. 3.

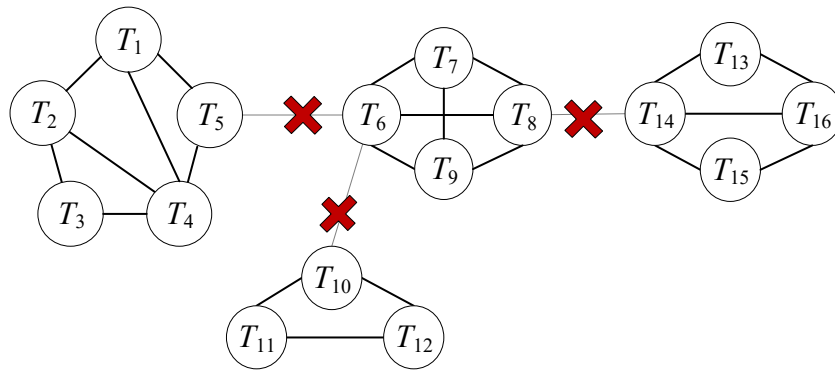


Рис. 3

Численный эксперимент. Результат моделирования работы сети МО и определения верхних и нижних граничных значений с помощью описанных методов приведен на рис. 4, где по оси ординат τ — среднее время пребывания заявки в сети МО, по оси абсцисс λ — интенсивность входного потока, 1 — верхняя граница, 2 — моделирование сети МО, 3 — нижняя граница.

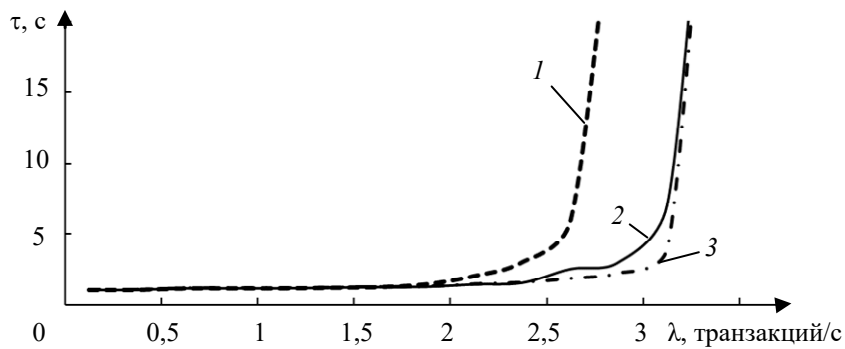


Рис. 4

С увеличением размеров кластеров „коридор“ между верхней и нижней границами будет сужаться — это говорит о том, что при асимптотическом анализе сложных систем с крупными кластерами схожих транзакций данные оценки покажут точный результат. На рис. 5 представлен график соотношения верхней и нижней границ среднего времени пребывания заявки в сети при наращивании размеров кластеров.

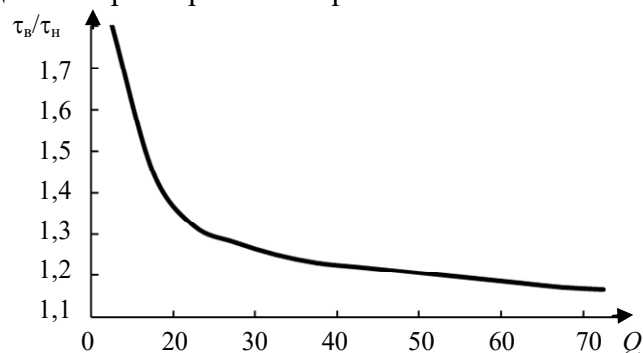


Рис. 5

Заключение. Представлены методы определения верхнего и нижнего граничных значений для среднего времени пребывания заявки в сети массового обслуживания. Предложенные методы основаны на добавлении/удалении избыточных зависимостей и на работе группы параллельных систем массового обслуживания. Асимптотический анализ структуры больших ИС показал, что точность верхней границы средней задержки в сети МО, основанной на избыточной зависимости, напрямую зависит от размеров кластеров схожих транзакций. При довольно больших размерах кластеров данный метод позволяет получить практически точную оценку временной характеристики системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Проскуряков Н. Е., Ануфриева А. Ю. Анализ и перспективы современных систем хранения цифровых данных // Изв. ТулГУ. Технические науки. 2013. Вып. 3. С. 368—377.
2. Challawala S., Mehta C., Patel K., Lakhatariya J. *MySQL 8 for Big Data: Effective Data Processing with MySQL 8, Hadoop, NoSQL APIs, and Other Big Data Tools*. Packt Publishing, 2017. 226 p.
3. Фомин Д. С., Бальзамов А. В. Проблематика обработки транзакций при использовании микросервисной архитектуры // Изв. вузов. Поволжский регион. Технические науки. 2021. Т. 58, № 2. С. 15—23. DOI: 10.21685/2072-3059-2021-2-2.
4. Богатырев В. А., Богатырев А. В., Богатырев С. В. Оценка надежности выполнения кластерами запросов реального времени // Изв. вузов. Приборостроение. 2014. Т. 57, № 4. С. 46—48.
5. Бурмистров В. Д., Заковряшин Е. М. Создание хранилища данных для распределенной системы // Молодой ученый. 2016. № 12. С. 143—147.
6. Татарникова Т. М., Вольский А. В. Оценка вероятностно-временных характеристик сетевых узлов с дифференциацией трафика // Информационно-управляющие системы, 2018. № 3(94). С. 54—60.
7. Шелест М. Н. Анализ средней задержки для одной модели сети массового обслуживания с резервированием ресурсов // Информационно-управляющие системы. 2022. № 2. С. 32—41. DOI: 10.31799/1684-8853-2022-2-32-41.
8. Богатырев В. А., Кармановский Н. С., Попцова Н. А., Паришутина С. А., Воронина Д. А., Богатырев С. В. Имитационная модель поддержки проектирования инфокоммуникационных резервированных систем // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16, № 5(105). С. 831—838. DOI: 10.17586/2226-1494-2016-16-5-831-838.
9. Харари Ф. Теория графов. М.: Ленанд, 2018. 304 с.
10. Shelest M. N., Bakin E. A. Analysis of parallel queueing network with mutual expectations // Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). Pitsataway, NJ, 2018. P. 1—4.

Сведения об авторах

Мария Николаевна Шелест

— аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения; E-mail: mshshelest@mail.ru

Татьяна Михайловна Татарникова

— д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Институт информационных технологий и программирования; директор; E-mail: tm-tatarn@yandex.ru

Поступила в редакцию 14.06.2022; одобрена после рецензирования 27.06.2022; принята к публикации 30.07.2022.

REFERENCES

1. Proskuryakov N.E., Anufrieva A.Yu. *News of the Tula State University. Technical Sciences*, 2013, no. 3, pp. 368–377. (in Russ.)
2. Challawala S., Mehta C., Patel K., Lakhatariya J. *MySQL 8 for Big Data: Effective Data Processing with MySQL 8, Hadoop, NoSQL APIs, and Other Big Data Tools*. Packt Publishing, 2017, 226 p.
3. Fomin D.S., Bal'zamor A.V. *University Proceedings. Volga Region. Technical Sciences*, 2021, no. 2(58), pp. 15–23, DOI:10.21685/2072-3059-2021-2-2 (in Russ.)
4. Bogatyrev V.A., Bogatyrev A.V., Bogatyrev S.V. *Journal of Instrument Engineering*, 2014, no. 4(57), pp. 46–48. (in Russ.)
5. Burmistrov V.D., Zakovryashin E.M. *Molodoy uchenyy* (Young Scientist), 2016, no. 12, pp. 143–147. (in Russ.)
6. Tatarnikova T.M., Volskiy A.V. *Information and Control Systems*, 2018, no. 3(94), pp. 54–60. (in Russ.)
7. Shelest M.N. *Information and Control Systems*, 2022, no. 2, pp. 32–41, DOI:10.31799/1684-8853-2022-2-32-41. (in Russ.)
8. Bogatyrev V.A., Karmanovsky N.S., Poptsova N.A., Parshutina S.A., Voronina D.A., Bogatyrev S.V. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2016, no. 5(16), pp. 831–838, DOI: 10.17586/2226-1494-2016-16-5-831-838. (in Russ.)
9. Harary F. *Graph Theory*, Addison–Wesley, 1969.
10. Shelest M.N., Bakin E.A. *Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*, Pitsataway, NJ, 2018, pp. 1–4.

Data on authors

Maria N. Shelest

— Post-Graduate Student; St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation; E-mail: mshshelest@mail.ru

Tatiana M. Tatarnikova

— Dr. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Institute of Information technologies and Programming; Director of the Institute; E-mail: tm-tatarn@yandex.ru

Received 14.06.2022; approved after reviewing 27.06.2022; accepted for publication 30.07.2022.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ФРАКТАЛЬНОГО АНАЛИЗА ИЗОБРАЖЕНИЙ
ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ОЦЕНКИ
ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ И РАСПОЗНАВАНИЯ ОБЪЕКТОВ

О. В. ЕСИКОВ^{1*}, Д. В. ТИТОВ²

¹Центральное конструкторское бюро аппаратостроения, Тула, Россия
*eovmail@rambler.ru

²Юго-Западный государственный университет, Курск, Россия

Аннотация. Предложен подход к повышению эффективности системы распознавания изображений объектов в комплексах мониторинга и зондирования и беспилотных средствах на основе применения дополнительного признака классификации. Определен перечень задач, решаемых в комплексах зондирования при построении системы распознавания объектов. Для формирования дополнительной характеристики объектов использовано значение фрактальной размерности (фрактальной сигнатуры) изображений их контуров. Представлены результаты фрактального анализа изображений объектов дорожного движения. Получены результаты фрактального анализа изображений территорий, пострадавших от стихийных бедствий. Для построения карты и гистограммы фрактальной размерности предложено использовать размерность Минковского. Представлены результаты экспериментальной проверки работоспособности предлагаемых методов и алгоритмов.

Ключевые слова: распознавание объектов, искусственные нейронные сети, фрактальный анализ, фрактальная размерность, стихийные бедствия

Ссылка для цитирования: Есиков О. В., Титов Д. В. Применение методов фрактального анализа изображений при решении задач оценки экологической обстановки и распознавания объектов // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 9. С. 630—639. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-9-630-639.

APPLICATION OF METHODS
OF FRACTAL IMAGES ANALYSIS IN SOLVING ENVIRONMENTAL ASSESSMENT
AND OBJECT RECOGNITION PROBLEMS

O. V. Esikov^{1*}, D. V. Titov²

¹Central Design Bureau of Instrument Engineering, Tula, Russia
*eovmail@rambler.ru

²Southwest State University, Kursk, Russia

Abstract. An approach to improving the efficiency of the image pattern recognition system in monitoring and sensing complexes, and in unmanned vehicles based on the use of an additional classification feature is proposed. Tasks to be solved in sensing complexes when constructing an object recognition system are listed. To form an additional characteristic of the object, the value of the fractal dimension (fractal signature) of its contour image is used. Results of fractal analysis of traffic objects images are presented. Fractal analysis of images of territories affected by natural disasters is demonstrated. To construct a dimension map and a fractal dimension histogram, the application of the Minkowski dimension is proposed. The results of experimental verification of the proposed methods and algorithms operability are presented.

Keywords: object recognition, artificial neural networks, fractal analysis, fractal dimension, natural disasters

For citation: Esikov O. V., Titov D. V. Application of methods of fractal images analysis in solving environmental assessment and object recognition problems. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 9. P. 630—639 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-9-630-639.

Введение. Развитие средств и комплексов дистанционного зондирования Земли, а также беспилотных систем и платформ привело к значительному расширению областей их практического применения и взрывному росту рынка соответствующих услуг [1—3].

К наиболее актуальным задачам, которые решаются комплексами дистанционного зондирования и беспилотными системами, относятся [3—7]:

- мониторинг и анализ экологической обстановки (на территориях, на отдельных природных и техногенных объектах);
- мониторинг, оценка и анализ развития стихийных бедствий (наводнения, пожары, техногенные катастрофы и др.);
- контроль состояния объектов мониторинга (системы передачи энергии и энергоносителей, лесные и водные массивы, ледовая обстановка, сельскохозяйственные угодья, объекты транспортной сети и транспортных потоков и др.);
- поиск потерпевших крушение объектов (воздушные, речные и морские суда и др.) и информационное обеспечение спасательных операций.

Основу решения указанных задач составляют обработка и анализ изображений (радиолокационных, оптического, ИК- и УФ-диапазонов).

Состав и порядок применения методов обработки изображения зависит от решаемой задачи. Наиболее часто используют пространственные, частотные и фрактальные методы [7—11]. Применение фрактальных методов [7] обработки совместно с традиционными [9] позволяет при решении перечисленных выше задач повысить качество получаемого результата при анализе изображений и распознавании объектов.

Фрактальные методы обработки и анализа базируются на расчете фрактальной размерности изображения или его участков, которая является мерой сложности изображения и позволяет описать уникальность наблюдаемого объекта, процесса или явления [8, 9, 12, 13]. Наиболее широко для оценки фрактальной размерности изображений контуров объектов применяется метод, основанный на использовании размерности Минковского [11].

Помимо перечисленных задач, по результатам обработки и анализа полученных изображений (видеопотоков), применительно к беспилотным системам, платформам и комплексам решаются задачи обеспечения автономности их функционирования в заданном пространстве (на заданной территории): определение оптимальных маршрутов движения и распознавание объектов, определяющих состояние транспортных потоков или составляющих цель поиска и др.

Применение методов фрактального анализа в системах распознавания. В настоящее время решение задачи распознавания объектов осуществляется преимущественно с использованием искусственных нейронных сетей (ИНС) [14—17]. Исходными данными служат предварительно обработанные изображения, содержащие распознаваемые объекты.

В значительной степени эффективность работы ИНС по распознаванию объектов зависит не только от выбора ее архитектуры для решаемой задачи, но и от качества обучающей выборки. Недостаточные полнота, репрезентативность или равномерность обучающей выборки могут существенно снизить качество распознавания объектов. Во многих случаях построение обучающей выборки требует больших трудозатрат, а объемы таких выборок значительные. Для случаев, когда классы распознаваемых объектов расположены в пространстве признаков достаточно близко друг к другу или пересекаются, качество распознавания, независимо от объема и состава обучающей выборки, может быть неудовлетворительным. Это характерно для близких по своему виду образцов воздушного, наземного и водного транспорта, объектов дорожного движения и др.

В этих случаях в роли дополнительной характеристики объекта предложено и экспериментально проверено применение фрактальной размерности изображения контура объекта [8]. При этом в качестве решающего правила в системе распознавания целесообразно применять ИНС типа автоэнкодер [12], на вход которого поступают результат распознавания объекта с использованием основной ИНС и значение фрактальной размерности исходного изображения контура распознаваемого объекта. Такой вариант построения системы позволит обеспечить

более надежное распознавание объектов, ИНС в том числе, независимо от условий, в которых получены изображения.

Порядок формирования элементов обучающей выборки для ИНС типа персептрон и формирования изображений контуров объектов „Мотоциклист“ и „Велосипедист“ (участников дорожного движения) представлен на рис. 1, а, б. На практике для формирования изображения контура объекта применялись преобразования Собела, Кирша, Лапласа, оператор Кенни и т.п. [7].

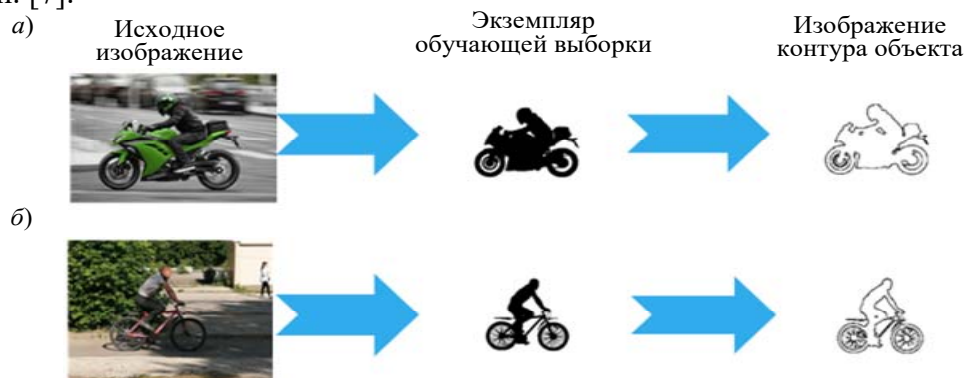


Рис. 1

На рис. 2 представлены отдельные результаты расчетов фрактальной размерности D изображений контуров (вид сверху) объектов воздушного транспорта. Как следует из полученных данных, изображения контуров гражданских воздушных судов имеют значение D в интервале 0,96—1,16, а вертолетов — в интервале 1,1—1,2.

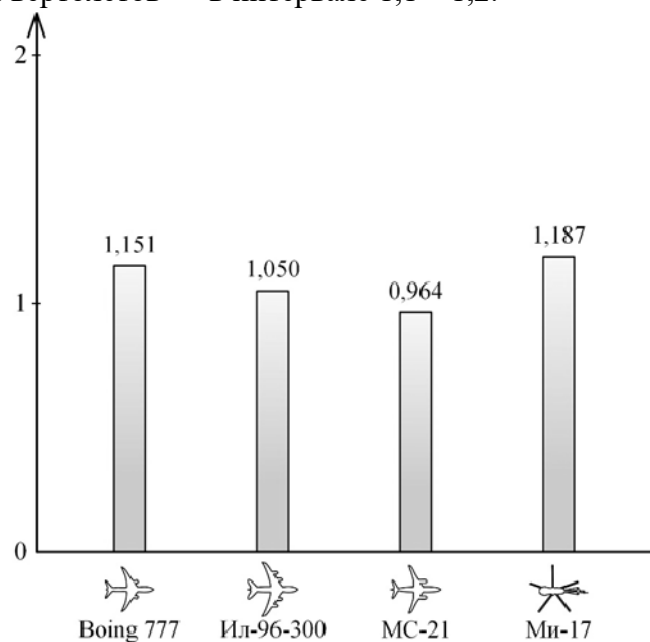


Рис. 2

Для отдельных объектов обучающей и тестовых выборок участников дорожного движения получены значения фрактальной размерности изображений их контуров; результаты обработки представлены в таблице.

D	Пешеход	Велосипедист	Мотоциклист	Легковой автомобиль	Грузовой транспорт	Пассажирский транспорт	Спецтехника
Среднее значение	1,195	1,322	1,240	1,111	1,092	1,178	1,191
СКО	0,040	0,074	0,050	0,032	0,058	0,030	0,063

Как видно из таблицы, особенности каждого из объектов дорожного движения могут быть описаны с помощью фрактальных характеристик изображений их контуров.

Для объектов дорожного движения характерным является вариативность ракурса представления изображения объекта, что, в отличие от объектов авиационной техники, приводит к изменению в некоторых пределах фрактальной размерности изображения контура объекта в зависимости от ракурса.

На рис. 3 приведены полученные диаграммы фрактальной размерности изображений контуров объектов колесной (кривая 1) и гусеничной (кривая 2) техники, представленных под различными ракурсами. Анализ рисунка показывает, что диаграммы фрактальной размерности этих объектов имеют свои характерные особенности. При этом для объектов колесной техники значение D лежит в интервале 1,04—1,12, гусеничной техники — в интервале 1,11—1,22 [13].

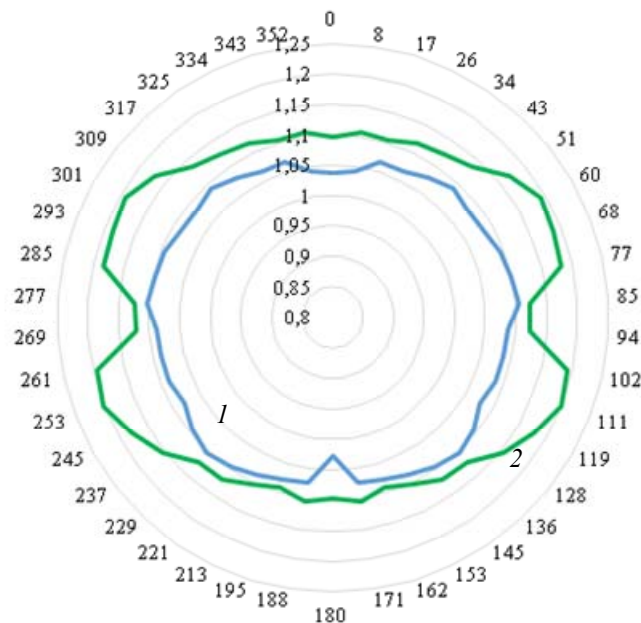


Рис. 3

На рис. 4 представлен скриншот, отображающий результаты распознавания изображений объектов дорожного движения, не входящих в обучающую выборку. Для изображений контуров объектов „Пешеход“ и „Легковой автомобиль“ показатель D принимает значения 1,196 и 1,084 соответственно, значения выходов нейронов, идентичных объекту классификации, составляют: для основной ИНС 0,77 и 0,87, для автоэнкодера 0,86 и 0,92 соответственно.

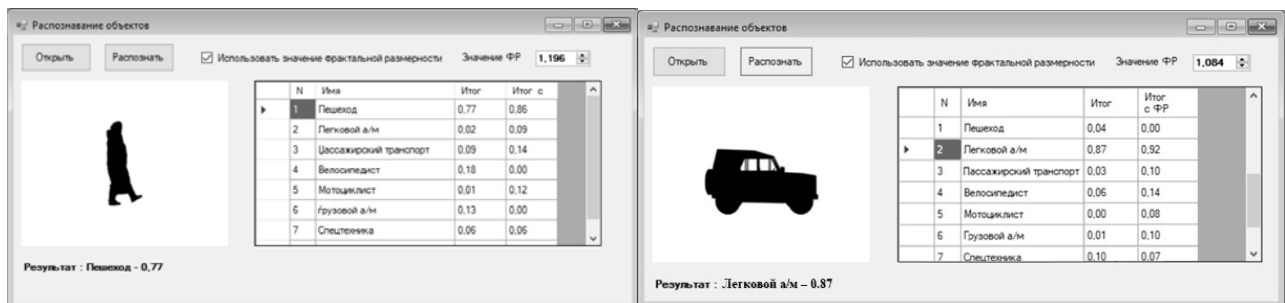


Рис. 4

Результаты распознавания экземпляров тестовой выборки с помощью ИНС типа персептрон показали [13], что использование значений фрактальной размерности изображений контуров объектов в качестве дополнительного признака классификации обеспечивает в 86 % случаев повышение качества распознавания на 15 %.

Применение методов фрактального анализа изображений для оценки экологической обстановки. В качестве наиболее эффективного средства наблюдения и источника данных о положении в зонах стихийных бедствий и техногенных катастроф, как правило, выступают авиационные средства наблюдения, и в первую очередь беспилотные [3—5]. Изображения, полученные с помощью указанных средств, отличаются потенциально высокой разрешающей способностью, а алгоритмы и методы фрактального анализа являются одним из перспективных способов обработки изображений, поступающих от этих средств наблюдения [8, 9].

Оценка последствий бедствий, катастроф и тенденций их развития с использованием методов фрактального анализа выполняется на основе формирования карты и гистограммы фрактальных размерностей [10—12, 14, 18, 19] черно-белого (полутонового) варианта исходного изображения (группы изображений), получаемого в результате применения методов его предварительной обработки [7, 10].

Для формирования карты фрактальной размерности (КФР) на изображение накладывается сетка с фиксированным размером ячейки. Посредством применения метода квадратов на основе использования размерности Минковского рассчитывается фрактальная размерность (ФР) фрагмента исходного изображения в каждой из ячеек [8, 9, 12, 18]. Размер ячейки зависит от масштаба изображения и величины оцениваемых объектов.

С использованием данных из открытых источников [20, 21] и разработанной программы [22] была произведена экспериментальная оценка применимости методов фрактального анализа для определения последствий стихийных бедствий и техногенных катастроф. Результаты эксперимента представлены на рис. 5—7.

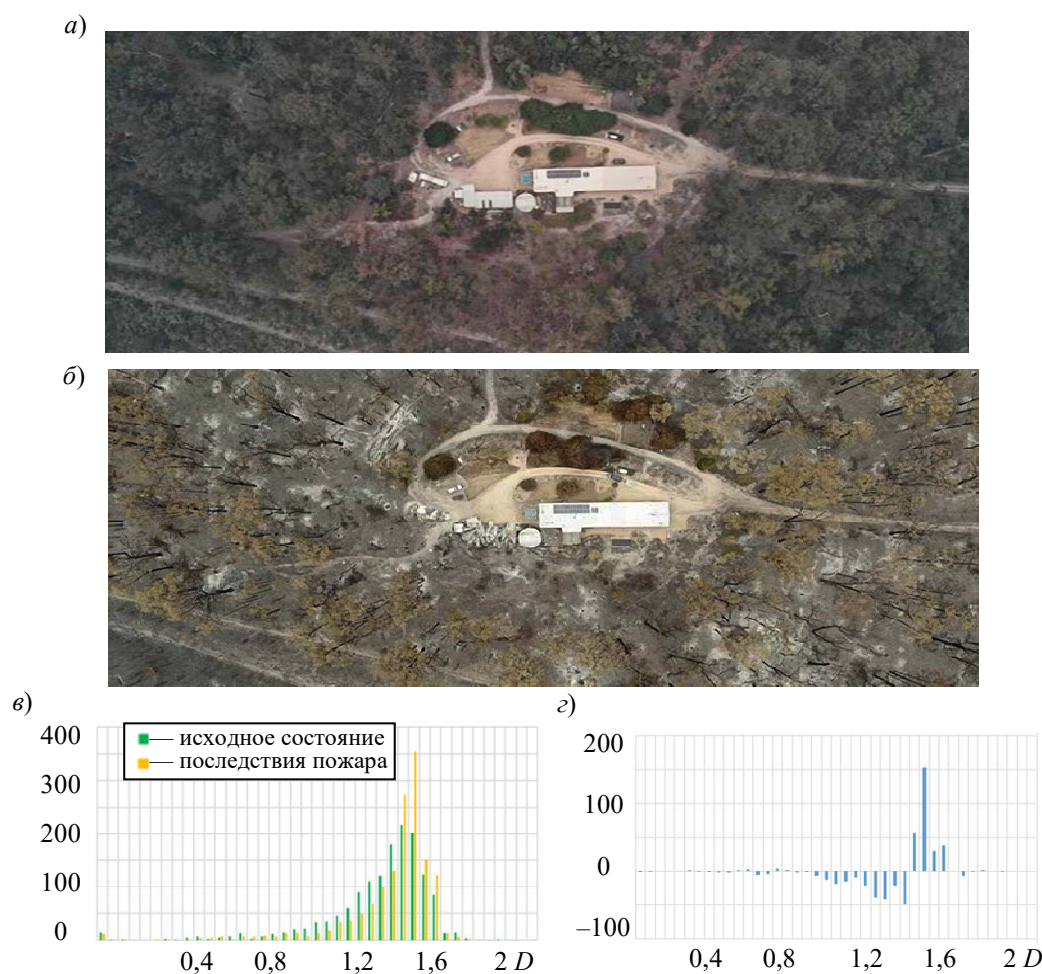


Рис. 5

На рис. 5, *а, б* представлены изображения участка лесного массива до и после пожара соответственно, на рис. 5, *в, г* — гистограммы фрактальной размерности данных изображений и их разность соответственно.

Как следует из полученных результатов обработки и фрактального анализа изображений, ФР участков изображения, соответствующих лесному массиву, имеет значения D в интервале от 1,10 до 1,65 с максимумом числа ячеек карты фрактальной размерности в 1,45. При этом доля площади лесного массива на исходном изображении (рис. 5, *а*) составляет 84 %.

Анализ представленных на рис. 5, *а, б* КФР изображений, а также рис. 5, *в* показывает, что фрактальная размерность ячеек карты, соответствующих участкам леса, попавшим под воздействие пожара, находится в том же диапазоне от 1,10 до 1,65. На КФР (рис. 5, *б*) этому диапазону соответствуют 88 % ячеек. Прирост на 4 % относительно исходного изображения объясняется тем, что под воздействие пожара попала часть построек, находящихся в центре изображения. Однако гистограмма ФР изображения на рис. 5, *б* имеет более сжатый вид с более выраженным пиком в точке 1,50. Это связано с тем, что в исходном изображении больше разнообразных текстурированных участков, соответствующих лесу, чем в изображении на рис. 5, *б*. Из рис. 5, *г* видно, что на карте фрактальной размерности изображения с последствиями пожара имеется прирост числа ячеек со значениями D от 1,45 до 1,60 в сумме на 19,6 %. Данные ячейки КФР соответствуют на рис. 5, *б* изображениям обгоревших деревьев (деревьев с обгоревшей кроной), т.е. участкам полностью уничтоженного леса.

На рис. 6, *а, б* представлены изображения городской застройки до и во время наводнения соответственно.

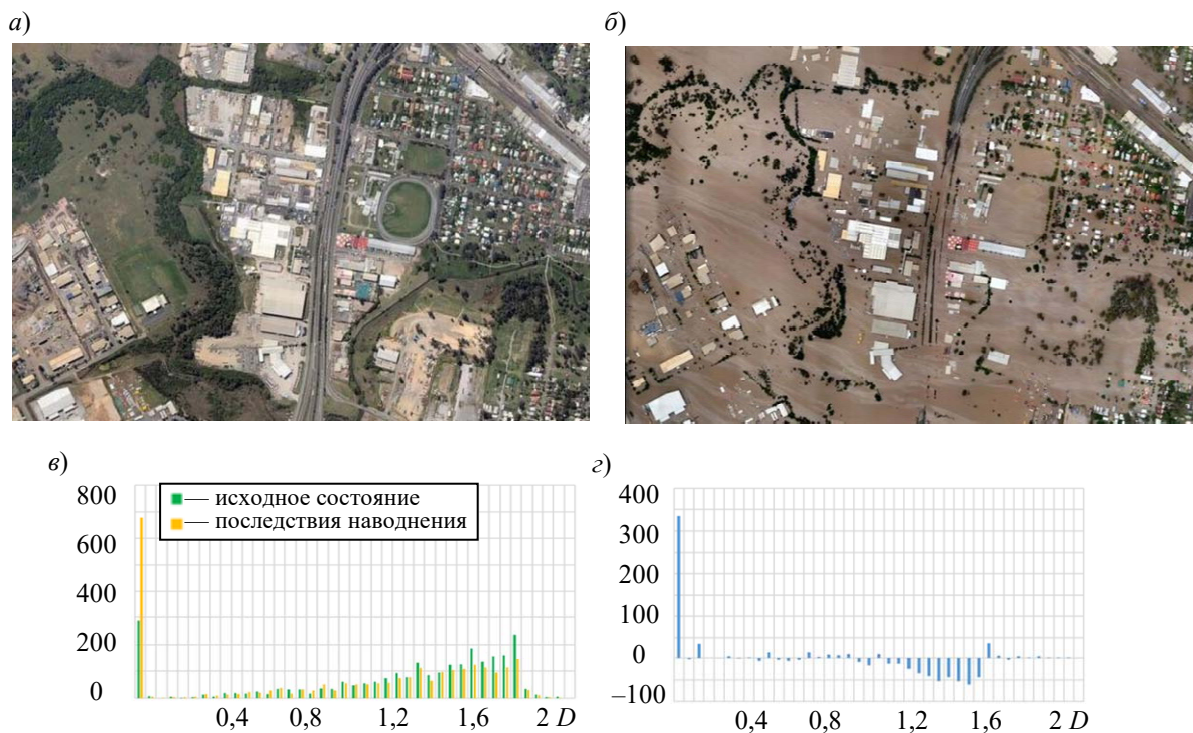


Рис. 6

Согласно результатам обработки и фрактального анализа изображений, ФР участков изображения, не имеющих ярко выраженной текстуры (ровные поверхности, крыши домов, поверхности водоемов и т.п.), близка к нулю, а участков, соответствующих водной поверхности при затоплении населенных пунктов, не превышает 0,4.

Анализ карт и гистограмм фрактальной размерности изображений, представленных на рис. 6, *в, г*, показал, что при затоплении населенного пункта (рис. 6, *б*) площадь участков изображения со значениями D от 0 до 0,4 увеличивается более чем в два раза, с 13 до 28 %. Это позволяет при известных параметрах рельефа местности, высоте отдельных объектов

ландшафта, застройки и т.п. судить о высоте подъема воды. Картину несколько смазывает наличие в населенном пункте зеленых насаждений и автомобилей в случае их частичного затопления.

ФР фрагментов изображений участков населенного пункта, не подвергшихся затоплению, или в случае, когда затопление не вносит существенного изменения в их изображение, например здания, зеленые насаждения и т.п., для двух изображений отличается незначительно (не более 0,12). Определение числа таких ячеек дает грубую оценку площади изображения, не подвергшейся затоплению (или затопленной частично) (рис. 6, б). Для полученных КФР доля таких ячеек составляет порядка 22 %.

Результаты оценки последствий техногенной катастрофы представлены на рис. 7.

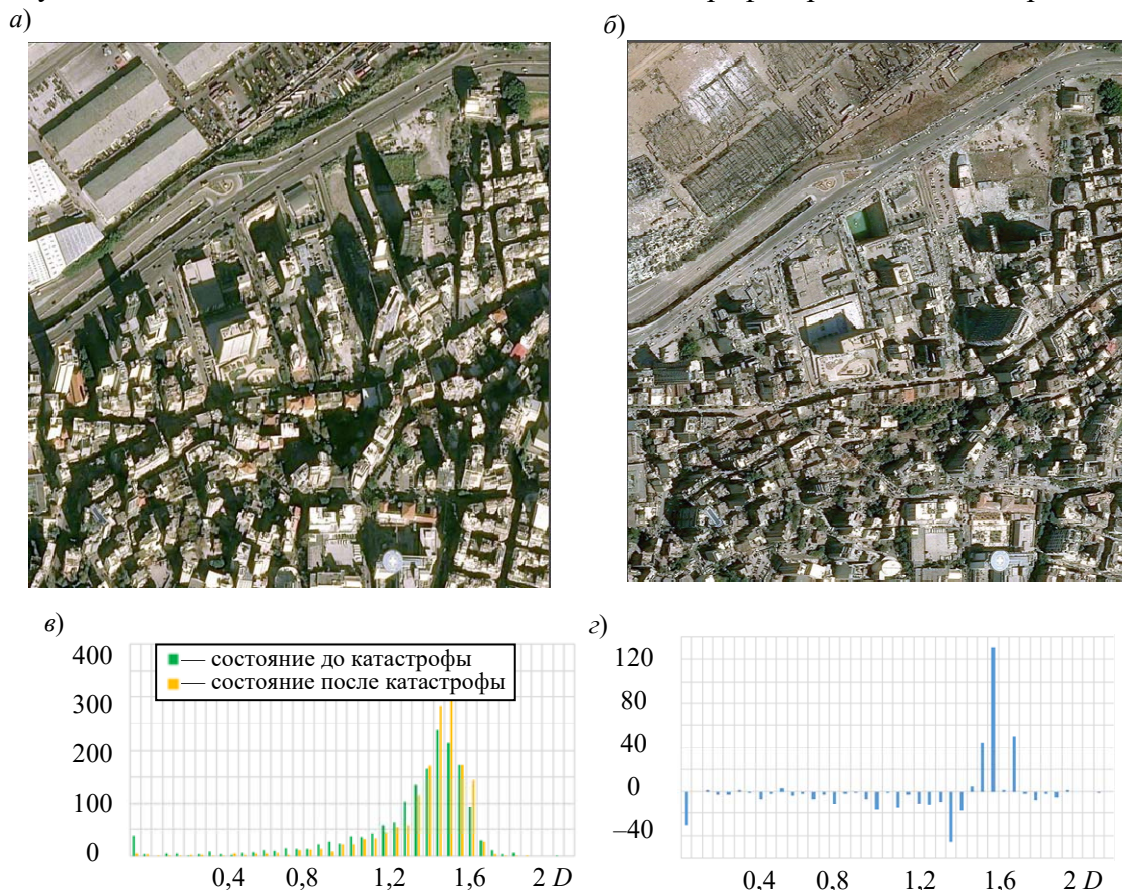


Рис. 7

В результате взрыва аммиачной селитры (2750 т) в порту Бейрута 4 августа 2020 г. полностью разрушены все здания и постройки, пострадала городская инфраструктура. Изображения участка городской инфраструктуры Бейрута до и после взрыва представлены на рис. 7, а, б соответственно.

Наибольшие повреждения (полное разрушение строений) получили здания и постройки, расположенные в левой верхней части изображения; в меньшей степени (повреждения и частичные обрушения конструкций) пострадали соответствующие объекты в центральной его части.

В связи с тем, что яркость и цвет элементов конструкций зданий на соответствующих фрагментах изображений (рис. 7, а) меняются незначительно, ФР этих фрагментов находится в интервале 0—0,4. Эти же фрагменты, изображенные на рис. 7, б, содержат обломки и остатки конструкций зданий и имеют существенно большую по сравнению с исходными текстурированность. Это приводит к тому, что значения D участков изображения, соответствующих зоне, наиболее пострадавшей от техногенной катастрофы, лежат в интервале от 1,30 до 1,6. При этом наблюдается уменьшение числа ячеек КФР со значениями менее 0,4, рост их числа

в диапазоне от 1,30 до 1,6 и смещение гистограммы вправо с ярко выраженным максимумом в области фрактальной размерности 1,45.

Анализ результатов, представленных на рис. 7, в, г, показывает, что площадь наиболее пострадавшей части городской застройки составляет порядка 15 % от общей площади изображения.

Заключение. Применение методов фрактального анализа позволяет успешно решать задачи формирования дополнительных характеристик объектов в системах их распознавания, кластеризации объектов мониторинга обстановки в зонах стихийных бедствий и техногенных катастроф, оценивать их состояние, выявлять аномалии, имеющие последствия для экологической обстановки, а также оценивать развитие аномальных ситуаций.

Вычислительная сложность алгоритмов фрактального анализа позволяет, в случае реализации их на современной вычислительной технике, оперативно обрабатывать достаточно большие массивы информации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бакланов А. И. Группировки микроспутников оптико-электронного наблюдения высокого разрешения // Материалы XV науч.-техн. конф. „Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли“. Алушта, 2018. С. 43—62.
2. Бакланов А. И. Новые тенденции развития космических систем оптико-электронного наблюдения Земли высокого разрешения // Материалы XIV науч.-техн. конф. „Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли“. Сочи, 2017. С. 32—49.
3. Данилов А. С. Система экологического мониторинга окружающей среды с использованием малогабаритных беспилотных летательных аппаратов // Экология и промышленность России. 2013. № 9. С. 4—7.
4. Коршунов Н. А., Котельников Р. В. Борьба с лесными пожарами: проблема информационного обеспечения авиасредствами и ее решение // Пожарная безопасность. 2008. № 1. С. 125—129.
5. Шовенгердт Р. А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. М.: Техносфера, 2010. 560 с.
6. Федоров А. М. Эффективность мониторинга техногенных объектов с применением беспилотных летательных аппаратов // Докл. БГУИР. 2015. № 7(93). С. 129—130.
7. Есиков О. В., Сухарев Е. М., Алтухов А. В., Тарасов Е. А. Оценка эффективности методов и алгоритмов обработки графической информации и распознавания объектов мониторинга // Научные технологии. 2011. № 4. С. 54—61.
8. Потапов А. А. Фракталы в дистанционном зондировании // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. 2000. № 6. С. 3—65.
9. Потапов А. А. Новейшие методы обработки изображений. М.: Физматлит, 2008. 496 с.
10. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2012. 1104 с.
11. Кронвер Р. М. Фракталы и хаос в динамических системах. Основы теории. М.: Постмаркет, 2000. 352 с.
12. Akinshin N. S., Potapov A. A., Bystrov R. P., Esikov O. V., Chernyshkov A. I. Building Systems for Object Recognition by Multichannel Sensing Systems Based on Neural Networks and Fractal Signatures // J. of Communications Technology and Electronics. 2020. Vol. 65, N 7. P. 835—842.
13. Есиков О. В., Денисова Н. А., Романюта А. Е. Результаты экспериментальной оценки эффективности архитектур искусственных нейронных сетей при решении задач распознавания объектов дорожного движения // Изв. ТулГУ. Технические науки. 2021. Вып. 2. С. 139—145.
14. Аггарвал Ч. Нейронные сети и глубокое обучение: Пер. с англ. М.: Изд. дом „Вильямс“, 2020. 752 с.
15. Simonyan K., Zisserman A. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition // arxiv preprint arxiv:1409.1556. 2014. [Электронный ресурс]: <<https://arxiv.org/abs/1409.1556>>, 13.07.2020.

16. He K., Zhang X., Ren S., Sun J. Deep residual learning for image recognition // Proc. IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition. 2016. P. 770—778.
17. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский; Пер. с польск. М.: Горячая линия–Телеком, 2004. 383 с.
18. Akinshin N. S., Esikov O. V., Potapov A. A., Akinshin R. N., Kuleshov A. V. Application of fractal analysis methods of Earth surface images for ecological setting assessment // EPJ Web Conf. 2019. Vol. 224, 04008 (MNPS-2019).
19. Акиншин Н. С., Есиков О. В., Чернышков А. И., Савчук К. В. Применение методов фрактального анализа изображений для решения задач мониторинга экологической обстановки // Изв. ТулГУ. Технические науки. 2019. № 10. С. 44—52.
20. <https://trinixy.ru/52197-do-i-posle-navodneniya-40-foto.html>
21. <https://trinixy.ru/167549-fotografii-malibu-so-sputnika-do-i-posle-pozharov-9-foto.html>
22. Свид. о рег. прогн. № 2019665064. Программа фрактального анализа изображений для оценки экологической обстановки / О. В. Есиков, А. В. Петешов, А. В. Кулешов, К. В. Савчук, А. Н. Ивутин. 18.11.2019 г.

Сведения об авторах

- Олег Витальевич Есиков** — д-р техн. наук, профессор; Центральное конструкторское бюро аппарата-строения, главный специалист; E-mail: eovmail@rambler.ru
- Дмитрий Витальевич Титов** — д-р техн. наук, доцент; Юго-Западный государственный университет, кафедра вычислительной техники; E-mail: titov.swsu@gmail.com

Поступила в редакцию 07.06.2022; одобрена после рецензирования 20.06.2022; принята к публикации 30.07.2022.

REFERENCES

1. Baklanov A.I. *Sistemy nablyudeniya, monitoringa i distantsionnogo zondirovaniya Zemli* (Systems of Observation, Monitoring and Remote Sensing of the Earth), Materials of the XV Scientific and Technical Conference, Alushta, 2018, pp. 43–62. (in Russ.)
2. Baklanov A.I. *Sistemy nablyudeniya, monitoringa i distantsionnogo zondirovaniya Zemli* (Systems of Observation, Monitoring and Remote Sensing of the Earth), Materials of the XIV Scientific and Technical Conference, Sochi, 2017, pp. 32–49. (in Russ.)
3. Danilov A.S. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* (Ecology and Industry of Russia), 2013, no. 9, pp. 4–7. (in Russ.)
4. Korshunov N.A., Kotelnikov R.V. *Pozharnaya bezopasnost'*, 2008, no. 1, pp. 125–129. (in Russ.)
5. Schowengerdt R.A. *Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing*, Elsevier, 2006, 560 p.
6. Fedorov A.M. *Reports of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics*, 2015, no. 7(93), pp. 129–130. (in Russ.)
7. Esikov O.V., Sukharev E.M., Altukhov A.V., Tarasov E.A. *Naukoyemkiye tekhnologii* (High Technologies), 2011, no. 4, pp. 54–61. (in Russ.)
8. Potapov A.A. *Zarubezhnaya radioelektronika. Uspekhi sovremennoy radioelektroniki*, 2000, no. 6, pp. 3–65. (in Russ.)
9. Potapov A.A. *Noveyshiye metody obrabotki izobrazheniy* (The Latest Image Processing Techniques), Moscow, 2008, 496 p. (in Russ.)
10. Gonzalez R.C., Woods R.E. *Digital Image Processing*, Prentice Hall, 2008, 954 p.
11. Crownover R.M. *Introduction to Fractals and Chaos*, Jones and Bartlett Books in Mathematics, 1995, 350 p.
12. Akinshin N.S., Potapov A.A., Bystrov R.P., Esikov O.V., Chernyshkov A.I. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2020, no. 7(65), pp. 835–842.
13. Esikov O.V., Denisova N.A., Romanyuta A.E. *News of the Tula State University. Technical Sciences*, 2021, no. 2, pp. 139–145. (in Russ.)
14. Charu C. Aggarwal, *Neural Networks and Deep Learning A Textbook*, Springer, 2018.
15. Simonyan K., Zisserman A. *Very deep convolutional networks for large-scale image recognition*, arxiv preprint arxiv:1409.1556, 2014, URL: <https://arxiv.org/abs/1409.1556>.
16. He K., Zhang X., Ren S., Sun J. *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 2016, pp. 770–778.
17. Rutkowska D., Pilinski M., Rutkowski L. *Sieci neuronowe, algorytmy genetyczne i systemy rozmyte*, Warszawa, Łódź, Wydawnictwo Naukowe PWN, 2004.
18. Akinshin N.S., Esikov O.V., Potapov A.A., Akinshin R.N., Kuleshov A.V. *EPJ Web of Conferences*, MNPS-2019, 2019, no. 224, pp. 04008.
19. Akinshin N.S., Esikov O.V., Chernyshkov A.I., Savchuk K.V. *News of the Tula State University. Technical Sciences*, 2019, no. 10, pp. 44–52. (in Russ.)
20. <https://trinixy.ru/52197-do-i-posle-navodneniya-40-foto.html>. (in Russ.)

21. <https://trinixy.ru/167549-fotografii-malibu-so-sputnika-do-i-posle-pozharov-9-foto.html>. (in Russ.)
22. Certificate on the state registration of the computer programs 2019665064, *Programma fraktal'nogo analiza izobrazheniy dlya otsenki ekologicheskoy obstanovki* (Fractal Image Analysis Program for Environmental Assessment), Esikov O.V., Peteshov A.V., Kuleshov A.V., Savchuk K.V., Ivutin A.N., Priority 11.11.2019, Published 18.11.2019. (in Russ.)

Data on authors

- Oleg V. Esikov** — Dr. Sci., Professor; Central Design Bureau of Instrument Engineering, Chief Specialist;
E-mail: eovmail@rambler.ru
- Dmitry V. Titov** — Dr. Sci., Associate Professor; Southwest State University, Department of Computer Engineering; E-mail: titov.swsu@gmail.com

Received 07.06.2022; approved after reviewing 20.06.2022; accepted for publication 30.07.2022.

**МОДЕЛЬ
ОЦЕНИВАНИЯ ГОТОВНОСТИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ
С УЧЕТОМ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СРЕДСТВ КОНТРОЛЯ**

Е. А. КОПЕЙКА*, А. Л. КОПЕЙКА, А. М. БАРАНОВСКИЙ

Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия

*vka@mil.ru

Аннотация. Рассматриваются вопросы обеспечения надежного функционирования сложных технических систем в ходе эксплуатации путем проведения планового технического обслуживания с применением средств контроля. Исследуется возможность проведения имитационного моделирования в целях оценивания наиболее важных показателей надежности системы, например коэффициента готовности, с учетом метрологических характеристик средств контроля. Предложены аналитическая и имитационная модели оценивания показателей готовности сложной технической системы и на основе программной среды AnyLogic проведено имитационное моделирование, по результатам которого построены зависимости коэффициента готовности системы от метрологических характеристик (ошибок контроля) применяемых средств контроля и параметров обслуживания.

Ключевые слова: модель, контроль технического состояния, сложные технические системы, имитационное моделирование, AnyLogic, коэффициент готовности

Ссылка для цитирования: Копейка Е. А., Копейка А. Л., Барановский А. М. Модель оценивания готовности сложных технических систем с учетом метрологических характеристик средств контроля // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 9. С. 640—647. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-9-640-647.

**MODEL FOR ASSESSING
THE READINESS OF COMPLEX TECHNICAL SYSTEMS
TAKING INTO ACCOUNT
THE METROLOGICAL CHARACTERISTICS OF CONTROL TOOLS**

E. A. Kopeyka*, A. L. Kopeyka, A. M. Baranovsky

A. F. Mozhaisky Military Space Academy, St. Petersburg, Russia

*vka@mil.ru

Abstract. The issues of ensuring the reliable functioning of complex technical systems during operation by carrying out scheduled maintenance with the use of controls are considered. The possibility of conducting simulation modeling in order to evaluate the most important indicators of system reliability, for example, the availability coefficient, taking into account the metrological characteristics of the control means, is being investigated. The study is declared to be of great importance for confirming theoretical statements about the influence of quality control on reliability indicators. Analytical and simulation models for assessing the readiness indicators of a complex technical system are proposed. Simulation modeling is carried out on the basis of the AnyLogic software environment, the obtained results are used to construct dependences of the system readiness coefficient on the metrological characteristics (control errors) of applied control tools and service parameters.

Keywords: model, technical condition control, complex technical systems, simulation modeling, AnyLogic, readiness factor

For citation: Kopeyka E. A., Kopeyka A. L., Baranovsky A. M. Model for assessing the readiness of complex technical systems taking into account the metrological characteristics of control tools. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 9. P. 640—647 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-9-640-647.

Введение. В настоящее время к процессу подготовки сложных технических систем (СТС) к применению предъявляются достаточно жесткие требования по качеству и оперативности. Достижение требуемых показателей надежности СТС зависит от свойств и характеристик аппарат-

ных средств и качества выполнения всех функций управления процессом их подготовки и обслуживания. Этим аспектам посвящено множество исследований [1—3], позволяющих получить аналитические модели влияния характеристик и системы обслуживания на качество СТС.

Измерения параметров технических систем, входящих в состав СТС, являются ответственными операциями технологического процесса эксплуатации, организация и технико-экономические показатели которого оказывают существенное влияние на готовность СТС, эффективность и безопасность их применения.

Несмотря на то, что измерения контролируемых параметров сами по себе не улучшают качество находящихся в эксплуатации систем (а даже ухудшают вследствие дополнительной выработки их ресурса), результаты измерений используются для повышения эффективности применения СТС путем учета действительных значений технических характеристик при подготовке к применению, а также при планировании выполнения профилактических мер по поддержанию систем в работоспособном и готовом к применению состоянии.

Метрологические характеристики средств измерений, используемых в процессе подготовки СТС к применению, изменяются под воздействием различных факторов (внешняя среда, внутренние тепловые шумы электронных устройств, источники питающих напряжений), что приводит к методическим ошибкам определения технического состояния. Влияние этих факторов на средства измерения также приводит к их метрологическим отказам. В настоящей статье рассматриваются постепенные отказы, связанные с износом, старением элементов средств измерения, постепенным уходом погрешности измерений за границы допуска.

Время наступления постепенного отказа функционально связано с интенсивностью физических процессов, происходящих в работающем приборе. Учет влияния характеристик средств измерения приводит к повышению достоверности моделей обслуживания и процессов контроля технического состояния СТС, что в итоге способствует повышению эффективности процесса подготовки системы к применению. В работах [4—7] приведены модели, оценивающие влияние характеристик процесса контроля на надежность СТС, однако не рассмотрено влияние этих характеристик на простои СТС в неработоспособных состояниях.

Предлагаемая модель может служить инструментом поддержки принятия решений, например, при совершенствовании системы технического обслуживания уже используемого и (или) нового внедряемого оборудования СТС и средств контроля. Примененный подход отличается новизной и предусматривает следующее:

— учет достоверности, периодичности и продолжительности контроля технического состояния при оценивании времени простоев в неработоспособных состояниях СТС и показателя ее готовности в целом при наличии ошибок оценивания состояния, вызванных погрешностями измерений;

— возможность учета дополнительных состояний при проведении различных видов контроля (оперативный, полный, тестовый, функциональный и др.).

Постановка задачи. Рассмотрим функционирование некоторой системы контроля (СК), включающей СТС как объект контроля и средство контроля (рис. 1).



Рис. 1

В произвольный момент времени СТС находится в работоспособном состоянии S_1 или неработоспособном состоянии S_2 , подвергается со стороны средства контроля периодическому

контролю, в ходе которого на СТС оказываются воздействия (тестовые сигналы), а от СТС на средство контроля подаются измеряемые параметры, по которым определяется техническое состояние системы. Функционирование СК представляет собой множество событий (переходов). Событие, с одной стороны, есть переход СТС в определенный вид технического состояния (S_1, S_2), который совершается при определенных условиях (значениях параметров СТС), а с другой — переход СК в следующие состояния: контроль работоспособного состояния (S_3) или контроль неработоспособной СТС (S_4). В этих состояниях СК возможны правильные и неправильные решения о переводе СТС в состояние восстановления работоспособности неработоспособной СТС (R_1), эксплуатации неработоспособной СТС (R_2), восстановления работоспособной СТС (R_3) или перевод работоспособной СТС в режим штатной эксплуатации (R_4). Модель СК представлена в виде кортежа:

$$M_{СК} = \langle S, T_{cp}, T_b, T_k, t_k, \alpha, \beta \rangle, \quad (1)$$

где $S = \{S_1, S_2, \dots, S_i | i \in \overline{1, k}\}$ — множество состояний (технические состояния СТС, состояния СК); T_{cp} — средняя наработка СТС на отказ; T_b — время восстановления работоспособности СТС; T_k и t_k — периодичность и время контроля технического состояния; α — ошибка контроля первого рода: условная вероятность получения решения „неработоспособно“ при контроле СТС, находящейся в работоспособном состоянии; β — ошибка контроля второго рода: условная вероятность получения решения „работоспособно“ при контроле СТС, находящейся в неработоспособном состоянии.

Требуется определить зависимость коэффициента готовности системы от вариаций ошибок контроля технического состояния, вызванных неверным определением текущего состояния системы из-за деградации метрологических характеристик средств контроля.

Допущение. В отдельный момент времени возможен только один переход на множестве состояний S .

Описание имитационной модели. Процесс эксплуатации СТС [8, 9], учитывающий ее возможные состояния и процесс контроля, представим в виде направленного графа (рис. 2), где изображены состояния S_1 — S_4 , а также состояние S_5 — поиск места отказа и восстановление СТС.

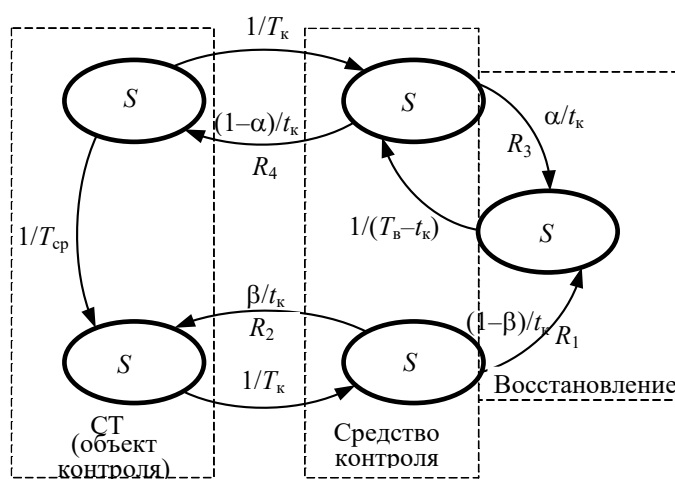


Рис. 2

Эксплуатация СТС начинается либо с работоспособного состояния S_1 , либо с неработоспособного состояния S_2 [10]. Переход из состояния S_1 в состояние СК S_3 осуществляется с интенсивностью $1/T_k$. При возникновении отказа в случайный момент времени происходит

переход из состояния S_1 в состояние S_2 с интенсивностью $1/T_{cp}$. Из состояния S_3 при получении системой контроля результата „параметры в допуске“ происходит возврат в S_1 с интенсивностью $(1-\alpha)/t_k$. Если же СК ложно получен результат „параметры не в допуске“, то осуществляется переход из состояния S_3 в состояние S_5 с интенсивностью α/t_k . При неработоспособном состоянии S_2 производится контроль неработоспособного состояния S_4 с интенсивностью $1/T_k$. При выдаче системой контроля результата „параметры в допуске“ СТС остается в неработоспособном состоянии с интенсивностью β/t_k и переводится по результатам контроля в состояние S_2 . Если отказ в состоянии S_4 обнаруживается правильно, то осуществляется переход в состояние S_5 с интенсивностью $(1-\beta)/t_k$. При восстановлении неисправного элемента СТС из состояния S_5 осуществляется переход в S_3 с интенсивностью $1/(T_v - t_k)$. Если восстановление СТС подтверждается контролем в состоянии S_3 , то осуществляется возврат в состояние S_1 с интенсивностью $(1-\alpha)/t_k$.

Модель оценивания коэффициента готовности СТС. Диаграмма состояний средства моделирования AnyLogic позволяет графически задать пространство состояний алгоритма поведения объекта и события, которые являются причинами срабатывания переходов из одних состояний в другие, а также действия, происходящие при смене состояний [11—13]. Средство моделирования AnyLogic дает возможность в процессе функционирования модели набрать статистические данные имитационной модели, что позволяет на основе этих данных определить зависимости коэффициента готовности СТС от различных характеристик процесса контроля технического состояния.

Графическое представление модели в среде AnyLogic состоит из диаграммы пяти состояний (рис. 3, скриншот), связанных между собой переходами, и совокупности переменных, задающих параметры условий переходов. На рис. 3 в правой части представлен интерфейс задания параметров: показатели достоверности при контроле технического состояния СТС (ошибки α и β) и временные параметры (T_{cp} , T_k , t_k , T_v); в нижней части — интерфейс вычисляемых в ходе моделирования параметров — времени пребывания t_i , $i = \overline{1,5}$, в состояниях S_i , $i \in \overline{1,5}$. Учет параметра t_i организуется за счет накопления интервалов времени по каждому входу и по каждому выходу из состояний.

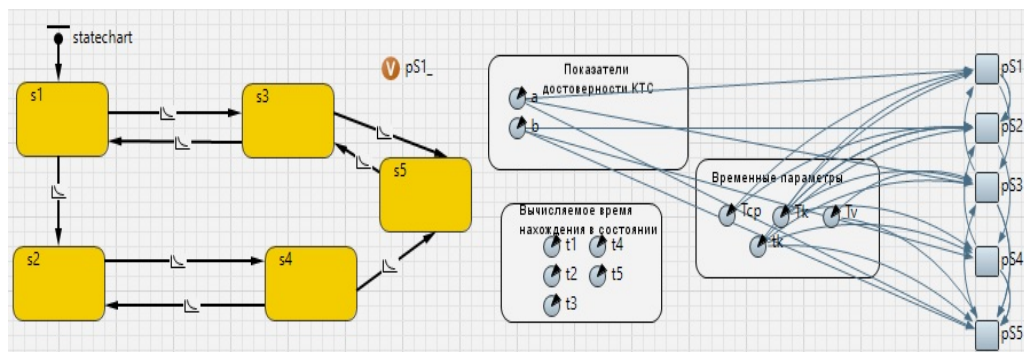


Рис. 3

На основе данных имитационной модели оценка коэффициента готовности СТС определяется как отношение

$$K_r = t_1 / \tau, \quad (2)$$

где t_1 — суммарное время пребывания в состоянии S_1 за время моделирования τ , τ — суммарное время пребывания в состояниях $S_1—S_5$.

Для подтверждения достоверности имитационной модели получим аналитическое выражение зависимости коэффициента готовности СТС от характеристик процесса контроля технического состояния на основе марковской модели графа, представленного на рис. 2. В стационарном режиме марковский процесс графа состояний можно описать системой алгебраических уравнений

$$\left. \begin{aligned} -\left(\frac{1}{T_{\text{cp}}} + \frac{1}{T_{\text{к}}}\right)P_{S_1} + \frac{1-\alpha}{t_{\text{к}}}P_{S_3} &= 0; \\ -\frac{1}{T_{\text{к}}}P_{S_2} + \frac{1}{T_{\text{cp}}}P_{S_1} + \frac{\beta}{t_{\text{к}}}P_{S_4} &= 0; \\ -\left(\frac{1-\alpha}{t_{\text{к}}} + \frac{\alpha}{t_{\text{к}}}\right)P_{S_3} + \frac{1}{T_{\text{к}}}P_{S_1} + \frac{1}{T_{\text{в}}-t_{\text{к}}}P_{S_5} &= 0; \\ -\left(\frac{\beta}{t_{\text{к}}} + \frac{1-\beta}{t_{\text{к}}}\right)P_{S_4} + \frac{1}{T_{\text{к}}}P_{S_2} &= 0; \\ -\frac{1}{T_{\text{в}}-t_{\text{к}}}P_{S_5} + \frac{\alpha}{t_{\text{к}}}P_{S_3} + \frac{1-\beta}{t_{\text{к}}}P_{S_4} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

В представленной системе уравнение $P_{S_1} + P_{S_2} + P_{S_3} + P_{S_4} + P_{S_5} = 1$ является нормирующим (проверочным). Так как P_{S_1} — вероятность пребывания СТС в работоспособном состоянии в произвольный момент времени в процессе ее эксплуатации, то значение вероятности P_{S_1} есть оценка коэффициента K_{Γ} , определяемая как $K_{\Gamma} = P_{S_1} / \sum_{i=1}^5 P_{S_i}$.

Решив систему уравнений (3), получим

$$K_{\Gamma} = \frac{T_{\text{к}}}{\frac{1}{1-\beta}T_{\text{к}}^2 + \left(1 + \frac{(T_{\text{в}}-t_{\text{к}})/T_{\text{cp}} + t_{\text{к}}/T_{\text{cp}}}{1-\alpha}\right)T_{\text{к}} + \frac{T_{\text{в}}}{1-\alpha} - (T_{\text{в}}-t_{\text{к}})}. \quad (4)$$

Результаты экспериментов. Исходные данные для проведения эксперимента: $T_{\text{cp}} = 500$ ч, $T_{\text{в}} = 2$ ч, $T_{\text{к}} = 10$ ч, $t_{\text{к}} = 0,2$ ч. Выходные параметры имитационной модели СТС — суммарное время пребывания системы в каждом из состояний $S_1 \dots S_5$: ($t_1 \dots t_5$).

После проведенных экспериментов оценки коэффициента K_{Γ} по имитационной и аналитической моделям отличаются только в начальном периоде моделирования, что объясняется переходным процессом (накопление достаточных данных). Таким образом, можно утверждать, что с помощью разработанной имитационной модели получены результаты, совпадающие с результатами вычислений по аналитической модели. Это подтверждает достоверность полученных моделей и возможность их применения в дальнейших исследованиях.

На рис. 4 показана полученная на основе имитационной модели поверхность, отображающая зависимость коэффициента готовности СТС от показателей α и β . Достоверность контроля задается изменением вероятностей ошибок 1-го и 2-го рода от 0 до 1. Областью допустимых значений достоверности контроля технического состояния, при которых коэффициент готовности СТС удовлетворяет заданным требованиям (превышает площадь критерияльной поверхности „требуемое значение K_{Γ} “), является проекция области над пересечением двух поверхностей.

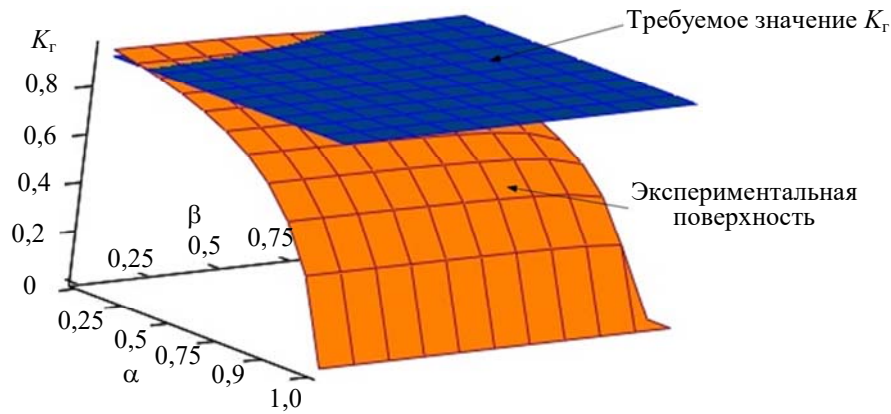


Рис. 4

Анализ соотношения (4) и полученных поверхностей позволяет сделать следующий вывод: при заданных параметрах надежности СТС контроль технического состояния мало эффективен с точки зрения обеспечения требуемого значения коэффициента K_r при больших ошибках контроля. Требуемое значение коэффициента K_r можно обеспечить за счет варьирования показателей надежности системы и определения оптимальной периодичности T_k , используя аналитическую модель. Для этого приравняем частную производную выражения (4) по T_k нулю:

$$\frac{d(K_r(T_k))}{dT_k} = 0,$$

и решим это уравнение относительно T_k . При найденном оптимальном значении $T_k = 281,62$ ч значение коэффициента готовности СТС достигает уровня $K_r(T_k) = 0,94$.

На рис. 5 представлена поверхность, отображающая зависимость коэффициента готовности СТС от времени контроля технического состояния. Критериальная область значений этих параметров, удовлетворяющих требуемому значению K_r , соответствует области над пересечением представленных поверхностей.

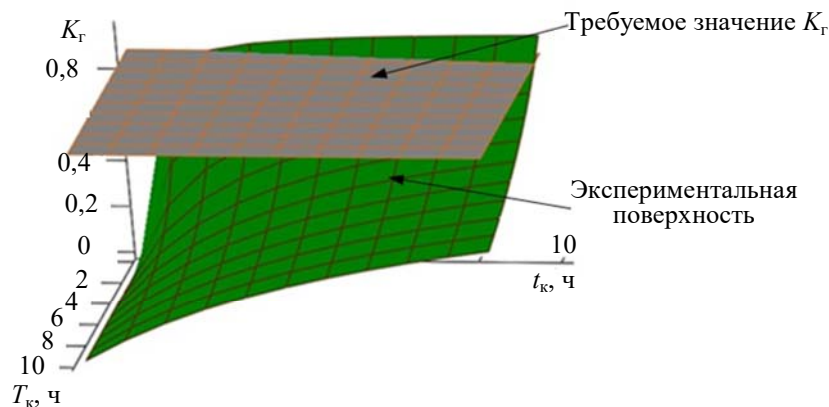


Рис. 5

Заключение. Применение методов программного моделирования процессов оценивания готовности СТС в среде AnyLogic позволяет оперативно произвести расчеты и выбрать приемлемые значения показателей обслуживания системы для достижения требуемых значений коэффициента ее готовности.

Результаты моделирования на основе разработанных моделей дают возможность перейти к решению широкого спектра прикладных задач, к которым можно отнести:

— разработку перспективных и доработку существующих СТС с учетом вероятностно-временных параметров контроля технического состояния;

— формирование требований к метрологическим характеристикам средств контроля и показателям контроля СТС в целом, обеспечивающим необходимый уровень коэффициента готовности СТС.

На основе развития предложенной имитационной модели может быть обеспечен более глубокий уровень детализации моделируемых процессов. Можно учитывать различные режимы эксплуатации сложных технических комплексов, деградации характеристик СТС и метрологических характеристик средств контроля. Дальнейшее развитие имитационной и аналитической моделей может быть связано также с расширением перечня оцениваемых затрат и переводом затрат, вызванных ошибками контроля, в область экономических показателей и показателей рисков в каждом из возможных состояний в ходе эксплуатации расширенной системы „СТС — средства контроля“. Представление СТС как многоканальной системы позволит оптимизировать совместный синтез элементов такой расширенной системы, обеспечивающий оптимальное сочетание показателей избыточности СТС и показателей контроля технического состояния системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Копейка А. Л., Дорожко И. В., Осипов Н. А. Имитационная модель оценивания коэффициента готовности сложных технических комплексов с учетом показателей контроля и диагностирования технического состояния // Тр. Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского. СПб, 2019. № 652. С. 303—313.
2. Захарова Е. А., Дорожко И. В., Копейка А. Л. Имитационная модель для оценивания показателей надежности сложных технических комплексов с учетом показателей контроля и диагностирования // Изв. ТулГУ. 2018. № 10. С. 490—498.
3. Аверьянов А. В., Барановский А. М., Эсаулов К. А. Определение пределов аппаратной избыточности информационных управляющих систем // Изв. вузов. Приборостроение. 2014. Т. 57, № 3. С. 23—25.
4. Захарова Е. А., Копейка А. Л., Кузнецов А. Б., Шавин А. С. Модель прогнозирования надежности автоматизированных систем с учетом этапов эксплуатации // Изв. ТулГУ. 2018. № 10. С. 424—430.
5. Лубков Н. В., Спиридонов И. Б., Степанянц А. С. Влияние характеристик контроля на показатели надежности систем // Тр. МАИ. 2016. № 85.
6. Захарова Е. А., Привалов А. Е., Дорожко И. В., Копейка А. Л. Имитационная модель оценивания коэффициента готовности сложных технических систем с учетом характеристик процесса диагностирования // Тр. МАИ. 2018. № 103.
7. Захарова Е. А., Барановский А. М. Модель оценивания готовности сложных технических систем с учетом показателей качества диагностирования // Тр. Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского. 2019. № 669. С. 124—132.
8. Боев В. Д. Компьютерное моделирование. Пособие для практических занятий, курсового и дипломного проектирования в AnyLogic 7. СПб, 2014. 432 с.
9. Зверев Г. Я. Оценка надежности изделия в процессе эксплуатации. М.: Ленанд, 2010. 96 с.
10. Дорожко И. В., Тарасов А. Г., Барановский А. М. Оценка надежности структурно-сложных технических комплексов с помощью моделей байесовских сетей доверия в среде GeNIe // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2015. № 3. С. 36—45.
11. Любченко А. А. Применение имитационного моделирования для определения вероятностных характеристик комплексных показателей надежности радиотехнических систем // Наука и современность. 2010. № 5—2. С. 246—251.
12. Якимов И. М., Кирпичников А. П., Мокишин В. В. Моделирование сложных систем в имитационной среде AnyLogic // Вестн. Казан. технолог. ун-та. 2014. № 13. С. 352—357.
13. Витюк В. Л., Гузенко В. Л., Миронов Е. А., Севостьянов Д. А., Шестопалова О. Л. Модель для расчета показателей качества функционирования системы технического обслуживания и ремонта сети связи // Фундаментальные исследования. 2015. № 5—3. С. 493—498.

- Сведения об авторах**
- Екатерина Алексеевна Копейка** — канд. техн. наук; ВКА им. А. Ф. Можайского, Военный институт (научно-исследовательский); ст. научный сотрудник; E-mail: Mashenkokatay@mail.ru
- Александр Леонидович Копейка** — канд. техн. наук; ВКА им. А. Ф. Можайского, Военный институт (научно-исследовательский); начальник лаборатории; E-mail: vka@mail.ru
- Анатолий Михайлович Барановский** — канд. техн. наук, доцент; ВКА им. А. Ф. Можайского, кафедра автоматизированных систем подготовки и пуска ракет космического назначения; ст. преподаватель; E-mail: vka@mail.ru

Поступила в редакцию 24.05.2022; одобрена после рецензирования 30.06.2022; принята к публикации 30.07.2022.

REFERENCES

1. Kopeika A.L., Dorozhko I.V., Osipov N.A. *Proceedings of the Mozhaisky Military Space Academy*, St. Petersburg, 2019, no. 652, pp. 303–313. (in Russ.)
2. Zakharova E.A., Dorozhko I.V., Kopeika A.L. *News of the Tula State University. Technical Sciences*, 2018, no. 10, pp. 490–498. (in Russ.)
3. Averyanov A.V., Baranovsky A.M., Esaulov K.A. *Journal of Instrument Engineering*, 2014, no. 3(57), pp. 23–25. (in Russ.)
4. Zakharova E.A., Kopeika A.L., Kuznetsov A.B., Shavin A.S. *News of the Tula State University. Technical Sciences*, 2018, no. 10, pp. 424–430. (in Russ.)
5. Lubkov N.V., Spiridonov I.B., Stepanyants A.S. *Trudy MAI*, 2016, no. 85. (in Russ.)
6. Zakharova E.A., Privalov A.E., Dorozhko I.V., Kopeika A.L. *Trudy MAI*, 2018, no. 103. (in Russ.)
7. Zakharova E.A., Baranovsky A.M. *Proceedings of the Mozhaisky Military Space Academy*, 2019, no. 669, pp. 124–132. (in Russ.)
8. Boyev V.D. *Komp'yuternoye modelirovaniye. Posobiye dlya prakticheskikh zanyatiy, kursovogo i diplomnogo proyektirovaniya v AnyLogic 7* (Computer Modelling. Handbook for Practical Training, Course and Diploma Design in AnyLogic 7), St. Petersburg, 2014, 432 p. (in Russ.)
9. Zverev G.Ya. *Otsenka nadezhnosti izdeliya v protsesse ekspluatatsii* (Assessment of Product Reliability during Operation), Moscow, 2010, 96 p. (in Russ.)
10. Dorozhko I.V., Tarasov A.G., Baranovsky A.M. *Intellectual Technologies on Transport*, St. Petersburg, 2015, no. 3, pp. 36–45. (in Russ.)
11. Lyubchenko A.A. *Nauka i sovremennost'*, 2010, no. 5-2, pp. 246–251. (in Russ.)
12. Yakimov I.M., Kirpichnikov A.P., Mokshin V.V. *Bulletin of Kazan Technological University*, 2014, no. 13, pp. 352–357. (in Russ.)
13. Vityuk V.L., Guzenko V.L., Mironov E.A., Sevostyanov D.A., Shestopalova O.L. *Basic Research*, 2015, no. 5–3, pp. 493–498. (in Russ.)

Data on authors

- Ekaterina A. Kopeyka** — PhD; A. F. Mozhaisky Military Space Academy, Military Research Institute; Senior Researcher; E-mail: Mashenkokatay@mail.ru
- Alexander L. Kopeyka** — PhD; A. F. Mozhaisky Military Space Academy, Military Research Institute; Head of the Laboratory; E-mail: vka@mail.ru
- Anatoly M. Baranovsky** — PhD, Associate Professor; A. F. Mozhaisky Military Space Academy, Department of Automated Systems for the Preparation and Launch of Space Rockets; Senior Lecturer; E-mail: vka@mail.ru

Received 24.05.2022; approved after reviewing 30.06.2022; accepted for publication 30.07.2022.

**АЛГОРИТМ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ
НА ОСНОВЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ**

М. Р. САЛИХОВ*, Р. А. ЮРЬЕВА

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

*fanny2man@gmail.com

Аннотация. Проведен анализ показаний датчиков производственного оборудования и представлена методика агрегации данных для оценки вероятности выхода оборудования из строя. Актуальность исследования обусловлена недостаточным развитием научно-методического аппарата оценивания состояния оборудования на основе больших данных. С целью формирования набора данных, предназначенного для разработки прогностической модели состояния оборудования, сконструирован ряд признаков, характеризующих состояние станка с числовым программным управлением. Практическая значимость исследования обусловлена возможностью включения сформированного набора данных в производственный процесс и использования его для сохранения во времени и в установленных пределах значений параметров оборудования, которые характеризуют его способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и при необходимых условиях применения.

Ключевые слова: анализ данных, машинное обучение, нейронные сети, автоматизация производства, LSTM

Ссылка для цитирования: Салихов М. Р., Юрьева Р. А. Алгоритм прогнозирования состояния оборудования на основе машинного обучения // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 9. С. 648—655. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-9-648-655.

**ALGORITHM FOR PREDICTING THE STATE OF EQUIPMENT
BASED ON MACHINE LEARNING**

M. R. Salikhov*, R. A. Yurieva

ITMO University, St. Petersburg, Russia

*fanny2man@gmail.com

Abstract. Analysis of production equipment sensors readings is carried out and a data aggregation technique is presented to assess the probability of equipment failure. The study relevance is due to the insufficient development of the scientific and methodological apparatus for assessing equipment condition based on big data. In order to form a data set intended for development of a predictive model of the equipment state, a number of features characterizing the state of machine with numerical program control are constructed. Practical significance of the study is related with the possibility of including the generated data set in the production process and using it to save the values of equipment parameters in time and within the established limits, which characterize its ability to perform the required functions in the specified modes and under the necessary conditions of use.

Keywords: data analysis, machine learning, neural networks, production automation, LSTM

For citation: Salikhov M. R., Yurieva R. A. Algorithm for predicting the state of equipment based on machine learning. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 9. P. 648—655 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-9-648-655.

Введение. В период эксплуатации производственного оборудования на его состояние влияет ряд случайных факторов. Наибольшее влияние на темпы ухудшения состояния оборудования оказывают такие факторы, как качество обслуживания и ремонта, температура окружающей среды, условия процесса, вибрация. Случайная природа этих факторов приводит к возникновению непредсказуемых изменений технического состояния промышленного оборуду-

дования, элементов его систем, механизмов и в результате к возможному выходу оборудования из строя.

При внедрении на предприятии „умного“ производства требования к надежности оборудования и управлению его обслуживанием постепенно возрастают. Часто возникает необходимость замены компонентов оборудования вследствие истечения срока их эксплуатации, однако на практике не всегда возможно вовремя заменить определенную деталь. Оборудование может быть отремонтировано, если переставшие работать компоненты не обеспечивают необходимые параметры в заданных пределах (технологическая и геометрическая точность, прецессия и т.д.). В этом отношении отказы элементов и параметрические отказы различны. Для повышения рентабельности производства рекомендуется проводить ремонт не при появлении фиксированной неисправности, а заранее, чтобы сократить время простоя оборудования.

Для прогнозирования неисправности промышленного оборудования на основе машинного обучения значительную часть работы занимает подготовка данных. В настоящей статье рассматривается возможность прогнозирования неисправностей оборудования на основе анализа показаний различных датчиков; представлены анализ данных и методика их „очистки“ от „дублирующих“ переменных, определен тип целевой переменной, осуществлен выбор метрики для упрощения последующих вычислений. Полученные результаты могут быть использованы для прогнозирования времени выхода оборудования из строя на основе машинного обучения.

Обзор предметной области. Для решения задачи прогнозирования отказов производственного оборудования было предложено множество методов и моделей. Отличительной характеристикой этих решений является набор входных и выходных данных и форма представления результатов.

Так, в работах [1—6] исследована группа методов, основанных на таких классических методах, как вероятностные методы и методы, базирующиеся на статистическом анализе данных. Перечисленные методы обеспечивают надежное прогнозирование отказов оборудования при различных условиях эксплуатации только при наличии модели генерации отказов, описывающей неисправности или отклонения от нормальной работы на основе данных, относящихся к предыдущим периодам эксплуатации оборудования.

Следующая группа применяемых методов базируется на интеллектуальном исследовании и анализе относительно больших массивов данных [7—11]. Результатом использования таких методов является выявление статистических закономерностей и связей на основе предоставленных массивов данных, что позволяет создавать модели для прогнозирования. Данные методы обеспечивают хорошие результаты для детектирования сбоев и выявления их локальных последствий. Однако в случае когда сбой имеет множественный характер, эти методы не дают приемлемых результатов, что ограничивает их использование в режиме реального времени.

Методология RCM (Reliability-Centered Maintenance) [12] основывается на идее обеспечения надежности критически важных производственных и технических бизнес-процессов. Иными словами, предполагается ранжирование агрегатов оборудования, остановка которых не позволит произвести продукцию либо нарушит ритмичность работы агрегатов и узлов, что не приведет к негативным последствиям. Основной проблемой являются операции с большими объемами данных, что в итоге невозможно без создания автоматизированной системы, содержащей характеристики и историю ремонтов оборудования.

Перспективными в области прогнозирования отказов представляются методы, базирующиеся на машинном обучении [13—18]. Данные методы применяются для создания моделей прогнозирования, построение которых основывается на ретроспективных и фактических данных, полученных в режиме реального времени от измерительных устройств. Благодаря обучению адаптация параметров модели прогнозирования происходит быстро, что

позволяет устанавливать новые сроки проведения плановых работ по ремонту оборудования. Таким образом, минимизируется, в значительной степени, время простоя оборудования. Ситуации, в которых отмечается ограниченное количество данных об отказах, являются существенным недостатком данных методов.

Анализ методов и программных средств прогнозирования отказов оборудования показывает, что имеющиеся методы и программное обеспечение не позволяют в полной мере решить задачу прогнозирования отказов в условиях малого количества неисправностей, больших объемов данных, изменяющихся режимов работы оборудования и в случае множественных отказов.

Реализация алгоритма прогнозирования. С целью формирования набора данных, предназначенного для разработки прогностической модели состояния оборудования (станка), было осуществлено конструирование признаков, характеризующих его состояние. Была проведена серия экспериментов по механической обработке деталей — восковых блоков размером $50 \times 50 \times 45$ мм — на фрезерном станке с ЧПУ на испытательном стенде. В каждом эксперименте получалась готовая восковая деталь с буквой „S“, вырезанной на верхней грани.

Подготовка данных. Общие данные (табл. 1) по каждому из 18 экспериментов приведены в тестовом наборе данных и содержат, в том числе, скорость подачи детали (V) и давление зажима (P), по результатам обработки деталей определялось изменение состояния инструментов, также отраженное в таблице (новые и изношенные).

Таблица 1

Номер эксперимента	V , мм/с	P , Па	Состояние инструмента
1	6	4,0	Изношенный
2	20	4,0	Изношенный
3	6	3,0	Изношенный
4	6	2,5	Изношенный
5	20	3,0	Изношенный

По результатам экспериментов были собраны данные временных рядов с частотой дискретизации 100 мс, отдельно представленные в файлах. Каждый файл содержит данные измерений, произведенных четырьмя двигателями на станке с ЧПУ (оси X , Y , Z и шпиндель S).

Признаки, характеризующие состояние станка, представлены в табл. 2.

Таблица 2

Наименование признака	Обозначение признака	Описание признака
Actual Position	X_d, Y_d, Z_d, S_d	Фактическое положение детали, мм
Actual Velocity	V_x, V_y, V_z, V_s	Фактическая скорость детали, мм/с
Actual Acceleration	a_x, a_y, a_z, a_s	Фактическое ускорение детали, м/с ²
Command Position	$X_{d0}, Y_{d0}, Z_{d0}, S_{d0}$	Исходное положение детали, мм
Command Velocity	$V_{x0}, V_{y0}, V_{z0}, V_{s0}$	Исходная скорость детали, мм/с
Command Acceleration	$a_{x0}, a_{y0}, a_{z0}, a_{s0}$	Исходное ускорение детали, м/с ²
Current Feedback	$I_{обр\ x}, I_{обр\ y}, I_{обр\ z}, I_{обр\ s}$	Обратная связь по току, А
DC Bus Voltage	$U_{ш\ x}, U_{ш\ y}, U_{ш\ z}, U_{ш\ s}$	Напряжение шины постоянного тока, В
Output Current	$I_{в\ x}, I_{в\ y}, I_{в\ z}, I_{в\ s}$	Выходной ток, А
Output Voltage	$U_{в\ x}, U_{в\ y}, U_{в\ z}, U_{в\ s}$	Выходное напряжение, В
Output Power	$P_{в\ x}, P_{в\ y}, P_{в\ z}, P_{в\ s}$	Мощность на выходе, кВт

При обработке результатов был произведен поиск нетипичных данных (выбросов). Для примера был взят признак Actual Velocity по оси X (см. табл. 2) — V_x (рис. 1, а, б). На графиках продемонстрированы значения без удаления выбросов.

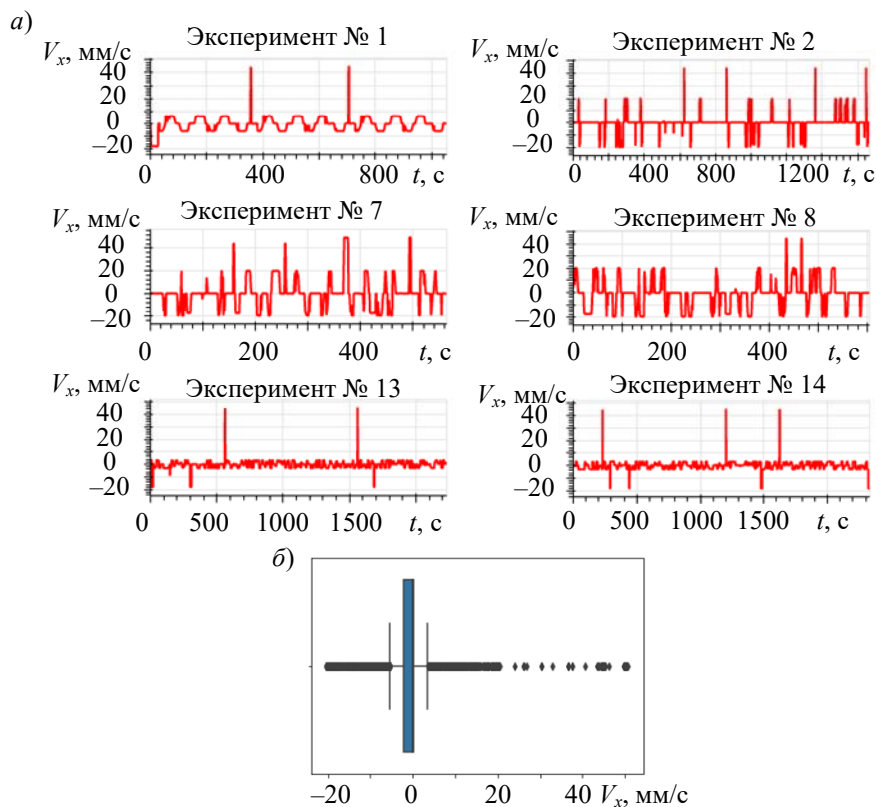


Рис. 1

Далее была проведена „очистка“ данных (data cleaning) от выбросов (рис. 2, а, б). Как можно понять из графиков, при удалении выбросов ничего конструктивного не происходит, выбросы служат некоторым показателем нестандартной работы оборудования.

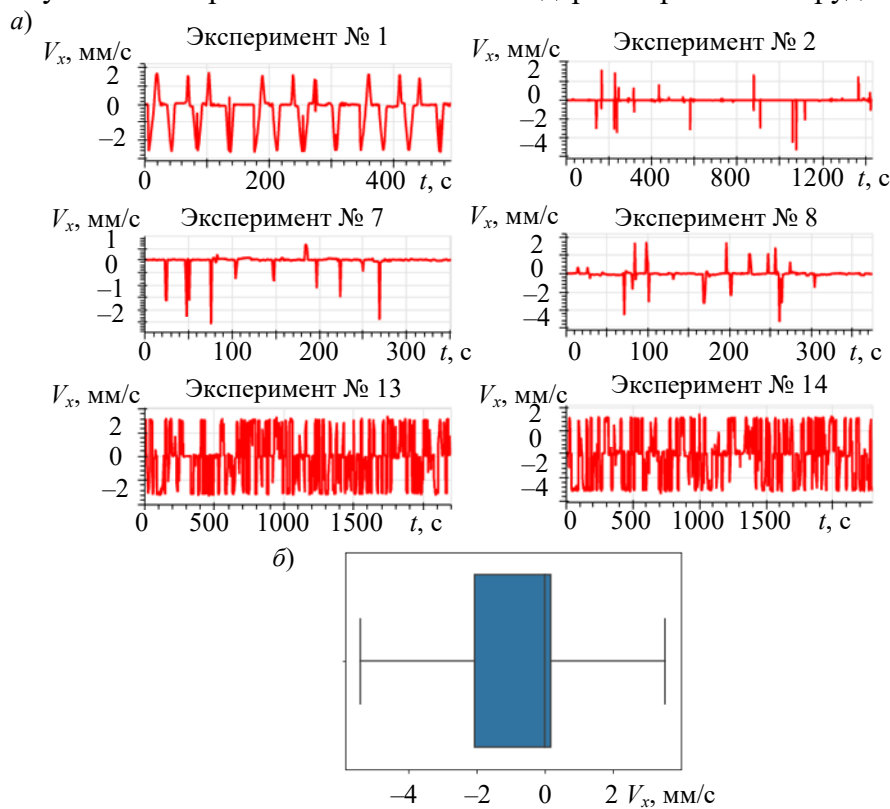
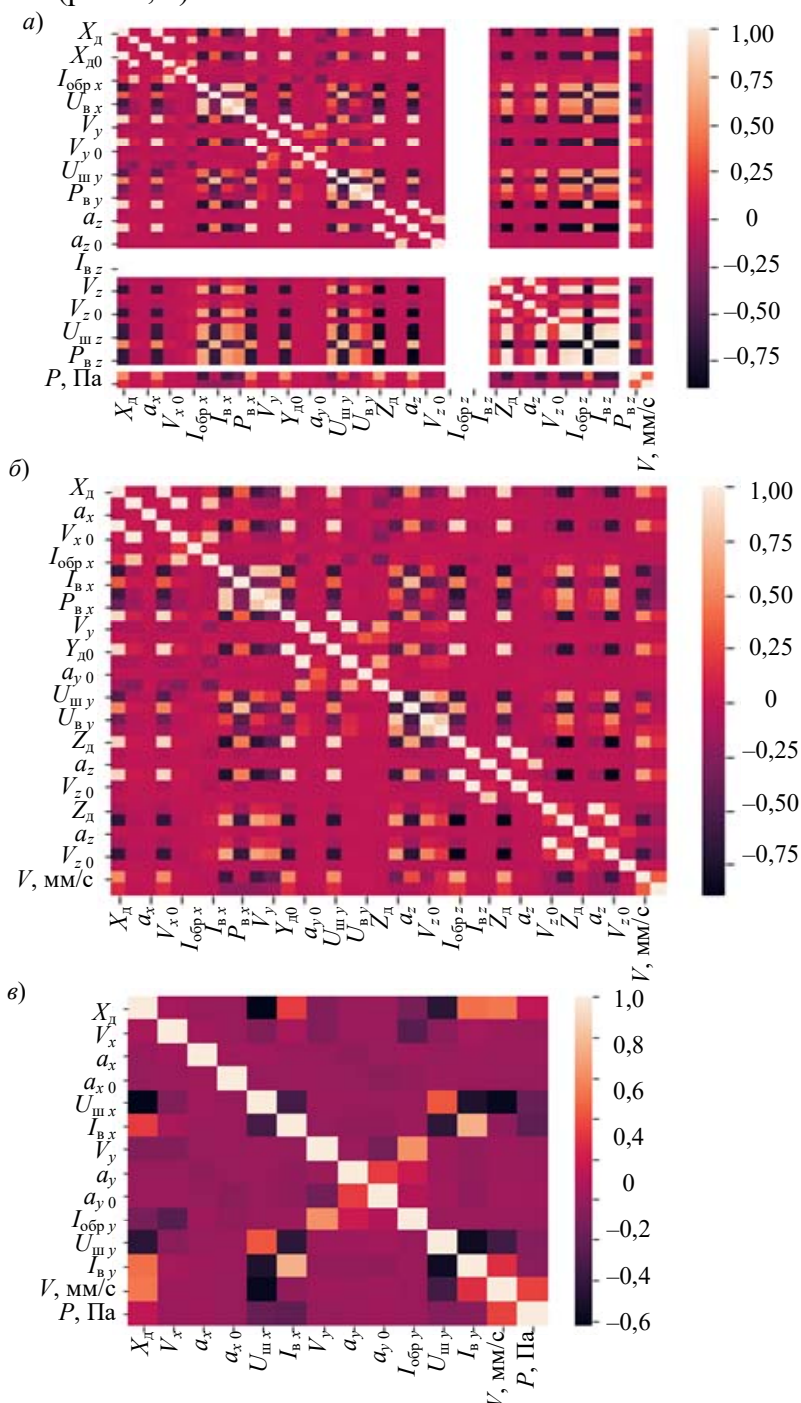


Рис. 2

Если признак характеризуется множеством показателей с одинаковыми значениями (неинформативный признак), он не несет полезной информации и исключается из набора данных. Такой вариант продемонстрирован фрагментом программы.

Z1 Исходное Ускорение: 99.46814%	Z1 Обратная Связь По Току: 100.00000%	Z1 Выходной Ток: 100.00000%
0.000000 21133	0.0 21246	0.0 21246
1000.000000 41		
-1000.000000 35	Z1 Напряжение Шины Постоянного Тока: 100.00000%	Z1 Выходное Напряжение: 100.00000%
-875.000000 7	0.0 21246	0.0 21246
-500.000000 5		

Матрица корреляций. Для выявления коррелирующих признаков была построена матрица корреляций (рис. 3, а, обозначения — согласно принятым в табл. 2). Анализ данной матрицы показывает, что некоторые признаки не несут никакой конструктивной информации и могут быть удалены (рис. 3, б).



Удаление коррелирующих признаков. Для оценки силы корреляционной связи, как правило, используются общепринятые критерии, согласно которым абсолютные значения коэффициента корреляции $r_{xy} < 0,4$ свидетельствуют о слабой связи, значения r_{xy} от 0,4 до 0,8 — о связи средней силы, значения $r_{xy} > 0,8$ — о сильной связи. Для удаления коррелирующих признаков был проведен отбор признаков, коэффициент корреляции которых больше 0,8 (рис. 3, в). Коррелирующими оказались такие признаки, как ускорение, напряжение, сила тока, скорость. При изменении одного признака следует изменение другого. Например, с увеличением силы тока, увеличивается и напряжение.

Значимость признаков. После произведенной „очистки“ данных были проведены эксперименты по расчету значимости признака, т.е. признака, оказывающего наибольшее влияние на отказ оборудования.

Для проведения эксперимента, исходя из целей задачи, были выбраны следующие алгоритмы машинного обучения:

- Random Forest Regressor (RFR);
- Gradient Busting Classifier (GBC);
- Gradient Busting Regressor (GBR).

На рис. 4, а—в представлены диаграммы, отражающие значимость признаков согласно указанным алгоритмам. Расчет значимости признаков был проведен без применения быстрого преобразования Фурье (БПФ).

Результаты расчета значимости признаков после применения БПФ представлены на рис. 5, а—в.

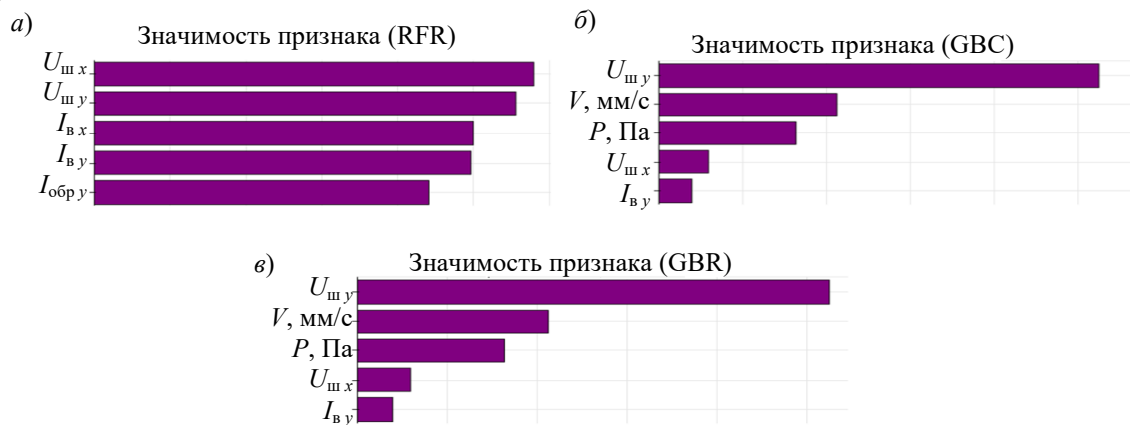


Рис. 4



Рис. 5

На основе данных расчета значимости признаков, влияющих на износ режущего инструмента, получено, что такие показатели, как сила тока и напряжение, оказывают наиболее значимое влияние на износ инструмента.

Алгоритм LSTM. Для реализации алгоритма LSTM (Long Short-Term Memory) в качестве входной информации использовался набор данных, содержащий ряд показаний одного из значащих признаков. После этого была проведена настройка модели, а именно выбор оптимизатора модели и метода оценивания ошибки.

Результат работы алгоритма — набор данных, содержащий спрогнозированные значения признака.

Заключение. Основополагающий принцип прогнозирования состояния станка с ЧПУ — использование предыдущих статистических данных. Информация о поведении станка в прошлом является базой для прогнозирования изменения его состояния в будущем. В рамках исследования проанализированы параметры, влияющие на прогнозирование состояния станка в следующий момент времени. По результатам прогнозирования можно количественно определить вероятность выхода оборудования из строя. Предложенный подход связан с исследованием рядов значений параметров оборудования и выявлением временных зависимостей показателей.

Для решения этой задачи могут быть использованы детерминированные и вероятностные модели, аппарат математического программирования, теория информации, теория статистических решений. Перспективным направлением исследований представляется проверка гипотезы о возможности прогнозирования отказов оборудования методами рекуррентных нейронных сетей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Седуш В. Я., Ченцов Н. А., Ченцова Н. С. Прогнозирование сроков отказа металлургического оборудования // Металлургическая и горнорудная промышленность. 1994. № 3. С. 75—77.
2. Антонов А. В. Вероятностные методы оценки остаточной наработки восстанавливаемых элементов ЯЭУ в условиях ограниченности исходных данных // Ядерная физика и инжиниринг. 2011. Т. 2, № 5. С. 421—424.
3. Антонов А. В. Методика статистического анализа данных об отказах оборудования АЭС в условиях неоднородного потока событий // Изв. вузов. Ядерная энергетика. 2016. № 3. С. 20—29.
4. Перехвост В. С. Прогнозирование параметрических отказов и особенность случайных процессов старения технических систем // Научные труды КубГТУ. 2014. № 3. С. 38—44.
5. Javed K. State of the art and taxonomy of prognostics approaches, trends of prognostics applications and open issues towards maturity at different technology readiness levels // Mechanical Systems and Signal Processing. 2017. Vol. 94, N 9. P. 214—236.
6. Gorjian N. Remaining usefulness of prediction of rotating equipment using covariate-based hazard models – Industry applications // Australian Journal of Mechanical Engineering. 2017. Vol. 15, N 1. P. 36—45.
7. Pitsyk V. V. Probabilistic Prediction of Residual Operating Life of Measurement Equipment Using Results of Parametric Monitoring // Measurement Techniques. 2016. Vol. 59, N 3. P. 216—221.
8. Чугреев В. Л., Баданин Д. А. Использование прогнозной аналитики в информационно-аналитических системах поддержки принятия решений // Молодой ученый. 2016. № 6. С. 49—52.
9. Боровиков С. М., ИТ-система прогнозирования надёжности сложных электронных систем методом анализа дерева отказов // Информационные системы и технологии: управление и безопасность. 2013. № 2. С. 140—144.
10. Mangalova M. S. Dysfunctional components prediction using cubic smoothing splines // Молодежь. Общество. Современная наука, техника и инновации. 2014. № 13. С. 198—199.
11. Лунатов М. Первый в России комплекс предиктивной аналитики для энергетического и промышленного оборудования // Экспозиция Нефть Газ. 2016. № 3 (49). С. 82—83.

12. Гаврилюк Е. А. Прогнозирование отказов систем автоматического управления газоперекачивающими агрегатами на основе индекса технического состояния и степени риска // *Фундаментальные исследования*. 2015. № 7—2. С. 309—313.
13. <https://toir.pro/mod/book/view.php?id=470&chapterid=370>
14. Зиберт А. О. Применения алгоритмов машинного обучения для повышения эффективности использования горной техники // *Universum: технические науки* (Электронный науч. журн.). 2016. № 2 (24).
15. Цикора М. Применение гибридного метода машинного обучения для описания и непрерывной оценки уровня метановой опасности в горной выработке // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2011. № 4. С. 95—107.
16. Уткин Н. Н. Использование методов машинного обучения для виброакустического диагностирования динамической системы шлифовальных станков // *Вестн. Саратов. гос. техн. ун-та*. 2011. Т. 2, № 2 (56). С. 271—275.
17. Wang Z. Failure prediction using machine learning and time series in optical network // *Optics Express*. 2017. Vol. 25, N 8. P. 18553—18565.
18. Wu W. A quantum multi-agent based neural network model for failure prediction // *J. of Systems Science and Systems Engineering*. 2016. Vol. 25, N 2. P. 210—228.

Сведения об авторах

Максим Русланович Салихов

— студент; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: fanny2man@gmail.com

Радда Алексеевна Юрьева

— канд. техн. наук, доцент; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: raddaiureva@itmo.ru

Поступила в редакцию 23.05.2022; одобрена после рецензирования 18.06.2022; принята к публикации 30.07.2022.

REFERENCES

1. Sedush V.Ya., Chentsov N.A., Chentsova N.S. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'*, 1994, no. 3, pp. 75–77. (in Russ.)
2. Sokolov S.V., Antonov A.V., Chepurko V.A. *Nuclear Physics and Engineering*, 2011, no. 5(2), pp. 421–424, DOI: 10.1134/S2079562911050058
3. Antonov A.V., Chepurko V.A. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*, 2016, no. 3, pp. 20–29. (in Russ.)
4. Perehvost V.S. *Scientific Works of the Kuban State Technological University*, 2014, no. 3, pp. 38–44. (in Russ.)
5. Javed K. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2017, no. 9(94), pp. 214–236.
6. Gorjian N. *Australian Journal of Mechanical Engineering*, 2017, no. 1(15), pp. 36–45.
7. Pitsyk V.V. *Measurement Techniques*, 2016, no. 3(59), pp. 216–221.
8. Chugreev V.L., Badanin D.A. *Molodoy uchenyy* (Young Scientist), 2016, no. 6, pp. 49–52. (in Russ.)
9. Borovikov S.M. *Information Systems and Technologies: Management and Security*, 2013, no. 2, pp. 140–144. (in Russ.)
10. Mangalova M.S. *Molodezh'. Obshchestvo. Sovremennaya nauka, tekhnika i innovatsii*, Krasnoyarsk, 2014, no. 13, pp. 198–199. (in Russ.)
11. Lipatov M. *Exposition Oil & Gas Magazine*, 2016, no. 3(49), pp. 82–83. (in Russ.)
12. Gavriluk E.A. *Fundamental Research*, 2015, no. 7-2, pp. 309–313. (in Russ.)
13. <https://toir.pro/mod/book/view.php?id=470&chapterid=370>
14. Zibert A.O. *Universum*, 2016, no. 2(24). (in Russ.)
15. Tsikora M. *Physical and Technical Problems of Mineral Development*, 2011, no. 4, pp. 95–107. (in Russ.)
16. Utkin N.N. *Bulletin of the Saratov State Technical University*, 2011, no. 2(2), pp. 271–275. (in Russ.)
17. Wang Z. *Optics Express*, 2017, no. 8(25), pp. 18553–18565.
18. Wu W. *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, 2016, no. 2(25), pp. 210–228.

Data on authors

Maxim R. Salikhov

— Student; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: fanny2man@gmail.com

Radda A. Yurieva

— PhD, Associate Professor; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: raddaiureva@itmo.ru

Received 23.05.2022; approved after reviewing 18.06.2022; accepted for publication 30.07.2022.

СОГЛАСОВАННАЯ РАБОТА ДВУХ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ
ПРИ АВТОМАТИЧЕСКОМ ВЫПОЛНЕНИИ ОПЕРАЦИЙ
В СЛОЖНОЙ ОКРУЖАЮЩЕЙ ОБСТАНОВКЕ

В. Ф. ФИЛАРЕТОВ^{1,2}, А. А. КАЦУРИН^{2*}

¹ *Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток, Россия*

² *Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия,
Институт проблем морских технологий ДВО РАН, Владивосток, Россия*

**katsurin@mail.ru*

Аннотация. Рассматривается задача управления манипулятором, установленным на основном мобильном роботе, выполняющем операции в стесненных условиях рабочей среды, когда объекты работ находятся вне зоны видимости системы технического зрения робота. В указанной ситуации расположение невидимых объектов вначале определяется с помощью системы технического зрения вспомогательного и более маневренного мобильного робота в его связанной системе координат, а затем эта информация по каналам связи с неизбежными погрешностями передается в связанную систему координат основного манипуляционного робота. Предложен алгоритм по определению и устранению возникших погрешностей, обеспечивающий в результате возможность точного автоматического выполнения требуемых операций с объектами работ. Предложенный математический аппарат позволяет учесть различную текущую пространственную ориентацию базовых платформ обоих мобильных роботов по углам крена, тангажа и рыскания в абсолютной системе координат. Приведены результаты экспериментов, подтверждающие работоспособность и высокую эффективность предложенного метода согласованной автоматической работы двух мобильных роботов в стесненных условиях окружающей среды.

Ключевые слова: *мобильный робот, групповое управление, система управления, манипулятор, система технического зрения*

Благодарности: работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант 22-29-01156.

Ссылка для цитирования: *Филаретов В. Ф., Кацурин А. А. Согласованная работа двух мобильных роботов при автоматическом выполнении операций в сложной окружающей обстановке // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 9. С. 656—667. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-9-656-667.*

COORDINATED WORK OF TWO MOBILE ROBOTS
WHEN PERFORMING OPERATIONS AUTOMATICALLY
IN A COMPLEX ENVIRONMENT

V. F. Filaretov^{1,2}, A. A. Katsurin^{2,*}

¹ *Institute of Automation and Control Processes of the Far Eastern Branch of the RAS, Vladivostok, Russia*

² *Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia,
Institute of Marine Technology Problems of the Far Eastern Branch of the RAS, Vladivostok, Russia
katsurin@mail.ru

Abstract. The problem of controlling a manipulator mounted on the main mobile robot performing operations in cramped working environment conditions when objects of work are out of sight of the robot's technical vision system, is considered. In this situation, location of the invisible objects is first determined using the technical vision system of an auxiliary and more maneuverable mobile robot in its associated coordinate system, and then this information is transmit-

ted via communication channels with unavoidable errors to the associated coordinate system of the main manipulation robot. An algorithm is proposed to determine and eliminate the aroused errors, which as a result provides the possibility of accurate automatic execution of the required operations with the objects of work. The proposed mathematical apparatus allows for accounting variations in current spatial orientation of the base platforms of both mobile robots at the angles of roll, pitch and yaw in the absolute coordinate system. The results of experiments confirming the operability and high efficiency of the proposed method of coordinated automatic operation of two mobile robots in cramped environmental conditions are presented.

Keywords: mobile robot, group control, control system, manipulator, vision system

Acknowledgments: the work was supported by the Russian Science Foundation, grant 22-29-01156.

For citation: Filaretov V. F., Katsurin A. A. Coordinated work of two mobile robots when performing operations automatically in a complex environment. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 9. P. 656—667 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-9-656-667.

Введение. В настоящее время области использования мобильной робототехники постоянно расширяются. Одним из перспективных направлений является применение мобильных роботов (МР) для полностью автоматического выполнения различных точных операций в стесненных условиях заранее неизвестной рабочей среды с помощью манипуляторов, устанавливаемых на МР [1—4]. Сейчас эти работы выполняются в полуавтоматическом режиме только оператором, который ориентируется по изображению рабочей зоны на экране телемонитора, полученному от системы технического зрения (СТЗ). При этом для получения наиболее удобного для оператора ракурса изображения рабочей зоны и объекта работ (ОР) могут использоваться СТЗ, которые способны изменять текущие ориентации своих оптических осей [5—8]. Для управляемых операторами манипуляционных МР многие задачи навигации и управления уже решены [9, 10]. При этом анализ показывает, что даже сложные манипуляционные операции вполне могут выполняться МР и в полностью автоматическом режиме. Но в этом случае потребуется использовать согласованное групповое управление несколькими МР, которое в настоящее время уже достаточно хорошо развито [11—17].

При перемещении группы МР в условиях неупорядоченной окружающей среды возможно возникновение ситуаций, когда основные СТЗ МР, оборудованных манипуляторами, не позволяют обеспечить требуемый ракурс изображения рабочей зоны, а объекты оказываются ненаблюдаемыми с помощью этих СТЗ. В таких случаях пространственные расположения и ориентации указанных объектов целесообразно определять с помощью СТЗ малых, более маневренных вспомогательных МР и затем передавать полученную информацию в связанные системы координат (СК) более громоздких манипуляционных роботов. Однако при работе в автоматическом режиме такое взаимодействие роботов будет затруднено, поскольку при передаче информации об объектах работ от вспомогательных МР к манипуляционным неизменно будут появляться погрешности, обусловленные как особенностями функционирования навигационных систем этих роботов, так и их СТЗ. Совместная работа двух МР в автоматическом режиме была рассмотрена в [18]. Но при использовании изложенного в этой работе подхода для определения существующих погрешностей при распознавании объекта и последующей передаче навигационной информации о его текущем расположении в СК, связанную с основным МР, оборудованным манипулятором, требуется применять специально изготовленный калибровочный инструмент. Для его захвата рабочим органом манипулятора выполняются дополнительные тестовые движения. В результате происходит значительное снижение производительности при выполнении требуемых манипуляционных операций, а также усложняется конструкция всей системы. Кроме того, такой подход не позволяет учесть текущую пространственную ориентацию в абсолютной СК обоих МР по углам крена, тангажа и рыскания. Это делает невозможным

использование данного подхода, если поверхность, по которой перемещаются МР, не является ровной и строго горизонтальной.

В результате задача разработки новых методов и алгоритмов, обеспечивающих точное и согласованное управление несколькими МР для выполнения заданных манипуляционных операций в автоматическом режиме, остается актуальной. Особое значение эта задача имеет в условиях произвольной, неупорядоченной окружающей среды.

Постановка задачи. В статье рассматривается задача разработки и исследования нового подхода к синтезу системы, предназначенной для обеспечения согласованной работы двух МР в автоматическом режиме. Основной МР оборудован многозвенным манипулятором и СТЗ, а второй — вспомогательный — только СТЗ. Создаваемая система предназначена для точного автоматического выполнения сложных манипуляционных операций с различными объектами в ситуациях, когда эти объекты не наблюдаются СТЗ основного МР, но находятся в рабочей зоне установленного на нем манипулятора. При этом только вспомогательный МР с помощью своей СТЗ может наблюдать объекты работ. Пространственные расположения и ориентации (координаты) объектов, определяемые СТЗ вспомогательного МР, далее должны быть переданы в связанную СК основного манипуляционного МР с неизбежными погрешностями, обусловленными ошибками при работе обеих навигационных систем и СТЗ, а также устройств связи МР. При этом текущие координаты и пространственные ориентации подвижных оснований обоих МР по углам крена, тангажа и рыскания в абсолютной СК формируются рельефами опорных поверхностей и принимаются произвольными.

Согласованная работа двух мобильных роботов. На рис. 1 приведена обобщенная схема взаимного расположения двух МР 1 и 2 в условиях неупорядоченной окружающей среды. В качестве основного МР 1 используется мобильная платформа, оборудованная шестистепенным манипулятором 3 типа PUMA с рабочим органом 4. МР 1 дополнительно оснащен своей СТЗ 5. На схеме показана возможная ситуация, когда СТЗ основного МР 1 не позволяет наблюдать объект 7, находящийся за препятствием. Вспомогательный МР 2 оснащен своей подвижной СТЗ 6, оптическая ось которой может менять пространственную ориентацию, поворачиваясь относительно двух взаимно перпендикулярных осей. Этот более маневренный МР 2 подходит к объекту 7 таким образом, чтобы его системе технического зрения 6 одновременно был виден как этот объект, так и рабочий орган 4 манипулятора МР 1. В дальнейшем МР 2 с помощью своей СТЗ 6 определяет их текущие координаты в СК C_2 . Полученные координаты с помощью навигационной системы 9 МР 2 с встроенными гироскопами из СК C_2 переводятся сначала в абсолютную систему координат (АСК) C_0 , а затем с помощью навигационной системы 8 МР 1, которая также включает гироскопы, в его СК C_1 .

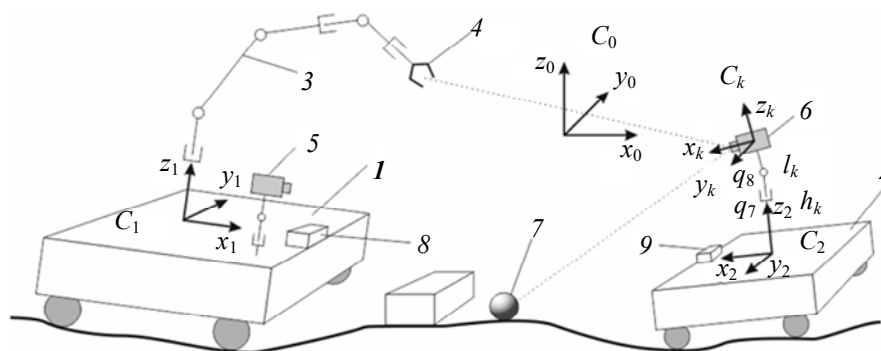


Рис. 1

Координаты как объекта 7, так и рабочего органа 4 манипулятора 3 определяются с помощью СТЗ 6 и передаются в СК C_1 с приблизительно одинаковыми погрешностями. Так как

всегда известны более точные координаты рабочего органа 4 манипулятора 3 в СК C_1 , то появляется возможность уточнения реального расположения объекта 7 в этой СК. Это позволяет обеспечить точную работу манипулятора с объектом 7 в автоматическом режиме, даже если СТЗ 5 основного МР не видит этот объект, только на основе исходной информации, получаемой от СТЗ 6 и затем передаваемой в СК C_1 по каналам связи.

Для указанного уточнения координат объекта 7 в СК C_1 необходимо сравнить координаты рабочего органа 4, которые определяются СТЗ 6 и передаются в СК C_1 , с его точными координатами в этой СК, которые определяются текущей конфигурацией манипулятора и рассчитываются с использованием известного типового алгоритма решения прямой задачи кинематики [19] на основе текущих значений всех его обобщенных координат, измеряемых датчиками угловых положений, встроенными во все соответствующие шарниры многозвенника. Таким образом удастся определить пространственную погрешность (ошибку), возникающую при определении и передаче навигационной информации о текущем расположении рабочего органа 4 в СК C_1 . Вектор этой погрешности затем используется для корректировки и определения точных координат объекта 7 в СК C_1 основного МР.

Перечисленные выше операции по определению и передаче координат объекта 7 и рабочего органа 4 из СК C_2 в СК C_1 выполняются при неизменном пространственном расположении обоих МР и СТЗ 6. Так как гироскопы навигационных систем 8 и 9 обоих участвующих в работе МР точно измеряют текущие значения углов крена, тангажа и рыскания в АСК, то определенный вектор погрешности при передаче координат рабочего органа 4 будет совпадать с вектором погрешности при передаче координат объекта 7. В результате скорректированные координаты этого объекта будут достаточно точно определять его реальное расположение в СК C_1 , а манипулятор 3 сможет точно выполнить заданные технологические операции в автоматическом режиме с объектом 7, находящимся вне зоны видимости СТЗ 5. Это позволит значительно расширить функциональные возможности манипуляционных МР за счет использования малогабаритных вспомогательных МР для эффективного выполнения многих операций даже в сложной обстановке окружающей среды, содержащей препятствия.

Алгоритм работы системы. Для технической реализации предложенного подхода был создан алгоритм работы вычислительной системы. При описании этого алгоритма используется матрица однородных преобразований $T_j^i \in T^{4 \times 4}$, содержащих элементарные повороты и сдвиги, которая применяется для преобразования вектора, заданного в повернутой и сдвинутой СК C_j , в вектор, заданный в неподвижной СК C_i [19].

Этап 1. С помощью встроенных навигационных систем 8 и 9 определяются векторы $c_{10} = [x_{10} \ y_{10} \ z_{10} \ 1]^T$ и $c_{20} = [x_{20} \ y_{20} \ z_{20} \ 1]^T$, задающие соответственно начала СК C_1 и C_2 в АСК, а также углы крена, тангажа и рыскания θ_{10} , θ_{20} , ψ_{10} , ψ_{20} , φ_{10} , φ_{20} основного и вспомогательного МР относительно осей АСК (углы поворотов СК C_1 и C_2 вокруг осей x_1 и x_2 , y_1 и y_2 , z_1 и z_2 соответственно). Реализация этих систем является уже типовой и детально описана в работе [10]. На этом же этапе соответствующими датчиками, встроенными в шарниры всех степеней подвижности манипулятора, измеряются текущие значения всех обобщенных координат, которые позволяют достаточно точно определить исходные значения координат векторов характерной точки A рабочего органа r_{c1} (см. рис. 2) и пятого шарнира манипулятора r_{m1} .

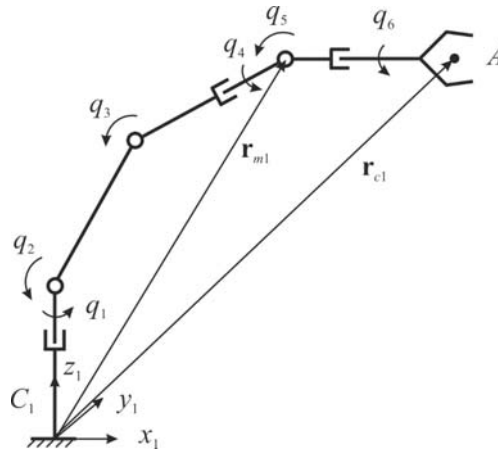


Рис. 2

Этап 2. С помощью стереоскопической СТЗ 6 [20] в СК C_k , связанной с этой СТЗ (см. рис. 1), определяются координаты геометрического центра объекта 7 — $\mathbf{o}'_{ck} = [x_{ock} \ y_{ock} \ z_{ock} \ 1]^T$ (здесь и далее штрих сверху указывает на обозначения векторов, определенных с помощью СТЗ 6) и вектора $\mathbf{r}'_{ck} = [x_{rck} \ y_{rck} \ z_{rck} \ 1]^T$ с координатами характерной точки рабочего органа манипулятора (точка A на рис. 2). Поскольку для существенного улучшения обзора изменяющейся рабочей зоны оптическая ось СТЗ 6 МР 2 может произвольно изменять свою пространственную ориентацию при введении двух ее степеней подвижности q_7 и q_8 (см. рис. 1), то для определения координат указанных двух векторов в СК C_2 вспомогательного МР можно использовать преобразования, подробно описанные в работах [5—8]. Сначала необходимо определить матрицу однородных преобразований $\mathbf{T}_k^2$, связывающую СК C_k и C_2 . Эту матрицу можно получить с помощью последовательного перемножения трех однородных матриц, реализующих поворот СК C_k на угол q_7 вокруг оси z_2 и сдвиг на высоту h_k вдоль этой оси (первая матрица), поворот на угол q_8 вокруг уже повернутой оси y_k (вторая матрица) и, наконец, сдвиг на длину звена l_k вдоль повернутой оси z_k (третья матрица). Перечисленные три однородные матрицы имеют стандартный вид [19]. В итоге получена искомая матрица $\mathbf{T}_k^2$:

$$\mathbf{T}_k^2 = \begin{bmatrix} c_7 & -s_7 & 0 & 0 \\ s_7 & c_7 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & h_k \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} c_8 & 0 & s_8 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -s_8 & 0 & c_8 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & l_k \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} c_7 c_8 & -s_7 & c_7 s_8 & c_7 s_8 l_k \\ s_7 c_8 & c_7 & s_7 s_8 & s_7 s_8 l_k \\ -s_8 & 0 & c_8 & h_k + c_8 l_k \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

где c_7, s_7, c_8, s_8 — $\cos q_7, \sin q_7, \cos q_8, \sin q_8$ соответственно.

Для преобразования векторов $\mathbf{o}'_{ck}$ и $\mathbf{r}'_{ck}$ из СК C_k в СК C_2 достаточно умножить их на матрицу $\mathbf{T}_k^2$. В результате получим $\mathbf{o}'_{c2} = \mathbf{T}_k^2 \mathbf{o}'_{ck}$, $\mathbf{r}'_{c2} = \mathbf{T}_k^2 \mathbf{r}'_{ck}$.

Для последующего преобразования векторов $\mathbf{o}'_{c2}$ и $\mathbf{r}'_{c2}$ из СК C_2 в СК C_0 необходимо построить матрицу однородных преобразований $\mathbf{T}_2^0$ и умножить их на эту матрицу. Матрица

T_2^0 также реализует последовательность элементарных поворотов и сдвига. Оси, относительно которых отсчитываются углы соответствующих поворотов СК C_2 , и последовательность этих поворотов должны выбираться такими, чтобы получаемые при этом углы θ_{20} , ψ_{20} , φ_{20} соответствовали углам, измеряемым гироскопами навигационной системы. Это условие выполняется, когда вначале осуществляются поворот СК C_2 на угол рыскания φ_{20} вокруг оси z_2 и сдвиг на вектор $\mathbf{c}_{20}$, затем поворот на угол тангажа ψ_{20} вокруг уже повернутой оси y_2 и после этого поворот на угол крена θ_{20} вокруг повернутой оси x_2 . Полученная таким образом матрица T_2^0 имеет следующий вид:

$$T_2^0 = \begin{bmatrix} c_{\varphi 2} & -s_{\varphi 2} & 0 & x_{20} \\ s_{\varphi 2} & c_{\varphi 2} & 0 & y_{20} \\ 0 & 0 & 1 & z_{20} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} c_{\psi 2} & 0 & s_{\psi 2} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -s_{\psi 2} & 0 & c_{\psi 2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_{\theta 2} & -s_{\theta 2} & 0 \\ 0 & s_{\theta 2} & c_{\theta 2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} c_{\varphi 2}c_{\psi 2} & c_{\varphi 2}s_{\psi 2}s_{\theta 2} - s_{\varphi 2}c_{\theta 2} & c_{\varphi 2}s_{\psi 2}c_{\theta 2} + s_{\varphi 2}s_{\theta 2} & x_{20} \\ s_{\varphi 2}c_{\psi 2} & s_{\varphi 2}s_{\psi 2}s_{\theta 2} + c_{\varphi 2}c_{\theta 2} & s_{\varphi 2}s_{\psi 2}c_{\theta 2} - c_{\varphi 2}s_{\theta 2} & y_{20} \\ -s_{\psi 2} & c_{\psi 2}s_{\theta 2} & c_{\psi 2}c_{\theta 2} & z_{20} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

где $c_{\theta 2}$, $s_{\theta 2}$, $c_{\psi 2}$, $s_{\psi 2}$, $c_{\varphi 2}$, $s_{\varphi 2}$ — $\cos\theta_2$, $\sin\theta_2$, $\cos\psi_2$, $\sin\psi_2$, $\cos\varphi_2$, $\sin\varphi_2$ соответственно.

Чтобы осуществить преобразование векторов $\mathbf{o}'_{c2}$ и $\mathbf{r}'_{c2}$ из СК C_2 в СК C_0 необходимо выполнить их умножение на матрицу T_2^0 , тогда $\mathbf{o}'_{c0} = T_2^0 \mathbf{o}'_{c2}$, $\mathbf{r}'_{c0} = T_2^0 \mathbf{r}'_{c2}$.

Для выполнения аналогичных преобразований векторов $\mathbf{o}'_{c0}$, $\mathbf{r}'_{c0}$ из СК C_0 в СК C_1 необходимо получить матрицу однородных преобразований T_0^1 . Но для этого проще сначала получить матрицу однородных преобразований T_1^0 , которая преобразует векторы из СК C_1 в АСК C_0 , учитывая, что C_1 также повернута относительно C_0 на углы θ_{10} , ψ_{10} , φ_{10} вокруг осей x_1 , y_1 и z_1 соответственно и сдвинута на вектор $\mathbf{c}_{10}$. В дальнейшем искомую матрицу T_0^1 можно определить, выполнив обратное преобразование полученной матрицы T_1^0 [19]. Аналогично предыдущему, несложно показать, что

$$T_1^0 = \begin{bmatrix} c_{\varphi 1} & -s_{\varphi 1} & 0 & x_{10} \\ s_{\varphi 1} & c_{\varphi 1} & 0 & y_{10} \\ 0 & 0 & 1 & z_{10} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} c_{\psi 1} & 0 & s_{\psi 1} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -s_{\psi 1} & 0 & c_{\psi 1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_{\theta 1} & -s_{\theta 1} & 0 \\ 0 & s_{\theta 1} & c_{\theta 1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} c_{\varphi 1}c_{\psi 1} & c_{\varphi 1}s_{\psi 1}s_{\theta 1} - s_{\varphi 1}c_{\theta 1} & c_{\varphi 1}s_{\psi 1}c_{\theta 1} + s_{\varphi 1}s_{\theta 1} & x_{10} \\ s_{\varphi 1}c_{\psi 1} & s_{\varphi 1}s_{\psi 1}s_{\theta 1} + c_{\varphi 1}c_{\theta 1} & s_{\varphi 1}s_{\psi 1}c_{\theta 1} - c_{\varphi 1}s_{\theta 1} & y_{10} \\ -s_{\psi 1} & c_{\psi 1}s_{\theta 1} & c_{\psi 1}c_{\theta 1} & z_{10} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{c}_{10}^* \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

где $c_{\theta 1}$, $s_{\theta 1}$, $c_{\psi 1}$, $s_{\psi 1}$, $c_{\varphi 1}$, $s_{\varphi 1}$ — $\cos\theta_1$, $\sin\theta_1$, $\cos\psi_1$, $\sin\psi_1$, $\cos\varphi_1$, $\sin\varphi_1$ соответственно; $\mathbf{R}$ — 3×3-матрица сложного поворота, включающего три элементарных поворота;

$\mathbf{c}_{10}^* = [x_{10} \ y_{10} \ z_{10}]^T$ — 3×1 -вектор-столбец сдвига.

В результате $\mathbf{T}_0^1 = (\mathbf{T}_1^0)^{-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}^T & -\mathbf{R}^T \mathbf{c}_{10}^* \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$, а координаты искомых векторов, преоб-

разованных из СК C_0 в СК C_1 , определяются из равенств $\mathbf{o}'_{c1} = \mathbf{T}_0^1 \mathbf{o}'_{c0}$, $\mathbf{r}'_{c1} = \mathbf{T}_0^1 \mathbf{r}'_{c0}$.

Этап 3. В СК C_1 определяется пространственная погрешность (ошибка передачи навигационной информации) $\Delta_{c1} = \mathbf{r}_{c1} - \mathbf{r}'_{c1}$ между реальными координатами точки A (определены на 1-м этапе) и ее координатами, полученными с помощью СТЗ 6 и переданными в СК C_1 .

Этап 4. Пересчитываются координаты объекта 7 на основе определенной пространственной погрешности при передаче информации в СК C_1 по формуле $\mathbf{o}_{c1.cor} = \mathbf{o}'_{c1} + \Delta_{c1}$.

Этап 5. На данном этапе начинается работа манипулятора с виртуальной моделью объекта 7, хранящейся в его памяти. Алгоритм дальнейшей работы манипулятора с объектом определяется особенностями выполнения требуемых технологических операций и в данной статье не рассматривается. Один из возможных вариантов такой работы манипулятора — автоматический захват объекта [21]. При этом в реальном масштабе времени решается обратная задача кинематики манипулятора для определения значений всех его обобщенных координат, а процесс движения рабочего органа вблизи объекта непрерывно контролируется СТЗ 6. Если обеспечивается точный подход к объекту и выполняются все заданные рабочие операции, то процесс продолжается. В случае если требуемая точность не обеспечивается, то работа манипулятора прекращается и сообщается о невозможности дальнейших действий.

Результаты исследований, представленные далее, показали, что предложенный алгоритм и аппарат преобразований соответствующих координат при передаче навигационной информации позволяют в процессе выполнения многозвенным манипулятором конкретных технологических операций в автоматическом режиме успешно определить, а затем и устранить не только погрешности, возникающие при вычислении текущих пространственных координат объекта с помощью СТЗ, но и погрешности работы используемых навигационных систем, которые определяют реальное расположение обоих МР в АСК C_0 .

Исследование работы системы. Для проверки эффективности практической реализации решенной выше задачи были выполнены натурные эксперименты. Однако из-за отсутствия мобильных роботов требуемой конфигурации для экспериментальных исследований предлагаемого метода использовались два стационарных манипулятора. При этом поскольку точность определения их взаимного расположения существенно выше точности позиционирования мобильных роботов, то с целью приближения условий эксперимента к реальным условиям эксплуатации мобильных роботов при определении расположения оснований этих манипуляторов в АСК специально дополнительно были внесены погрешности, соответствующие возможностям современных инерциальных систем навигации мобильных роботов [22], использующих ультракороткую базу.

Общий вид экспериментального комплекса показан на рис. 3, где 1 — основной манипулятор (Mitsubishi RV-2-FB) со связанной с ним СК C_1 , предназначенный для захвата и перемещения объекта, 2 — вспомогательный манипулятор (KUKA KR 6 R700 sixx) со связанной с ним СК C_2 , управляющий стереокамерой ZED, которая определяет координаты объекта в СК C_k при любой пространственной ориентации ее оптической оси. Эти координаты передаются сначала в СК C_2 , а затем в СК C_1 . Оси x_1 и y_1 , а также x_2 и y_2 расположены в плоскости рабочего стола, на котором жестко закреплены оба манипулятора. Оси x_1 и x_2 параллельны и встречно ориентированы.

Начало АСК C_0 связано с углом рабочего стола, а ее оси x_0 и y_0 также расположены в

плоскости стола. Координаты начала СК C_1 и C_2 в АСК C_0 задаются векторами $\mathbf{c}_{10} = [1329 \quad -116 \quad 0 \quad 1]^T$ и $\mathbf{c}_{20} = [563 \quad -559 \quad 0 \quad 1]^T$ соответственно. СК C_1 и C_2 относительно АСК повернуты вокруг своих осей z_1 и z_2 на углы рыскания $\varphi_{10} = 150^\circ$, $\varphi_{20} = 30^\circ$ соответственно. В качестве объекта работ использован цилиндр красного цвета, координаты которого определяются координатами центральной точки на его верхней крышке.

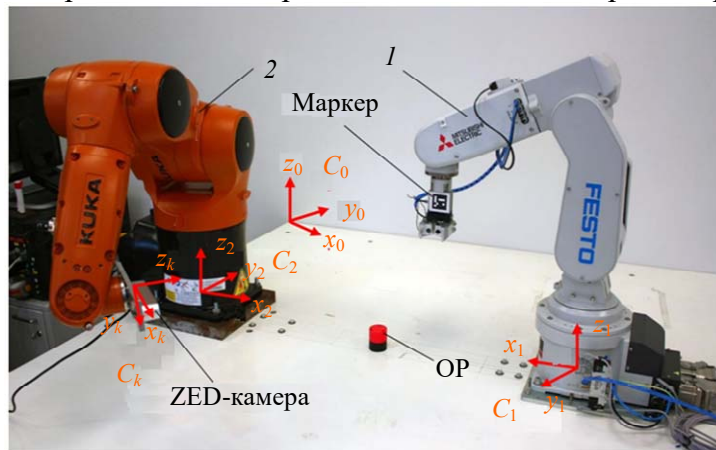


Рис. 3

Для определения погрешности при передаче навигационной информации и последующей ее компенсации в эксперименте вместо характерной точки рабочего органа манипулятора I использовался закрепленный на нем более информативный специальный AgUco-маркер, положение центральной точки которого известно.

Ось z_k встроенной СК C_k ZED-стереокамеры совпадает с оптической осью ее левого объектива (рис. 4). Оси x_k и y_k расположены в плоскости задней стенки стереокамеры. При этом стереокамера так закреплена на фланце манипулятора 2, что оси ее СК C_k параллельны осям СК C_3 , расположенной в центральной точке фланца. Координаты начала СК C_k в СК C_3 задаются вектором $\mathbf{k}_3 = [-60 \quad 15 \quad 10 \quad 1]^T$.

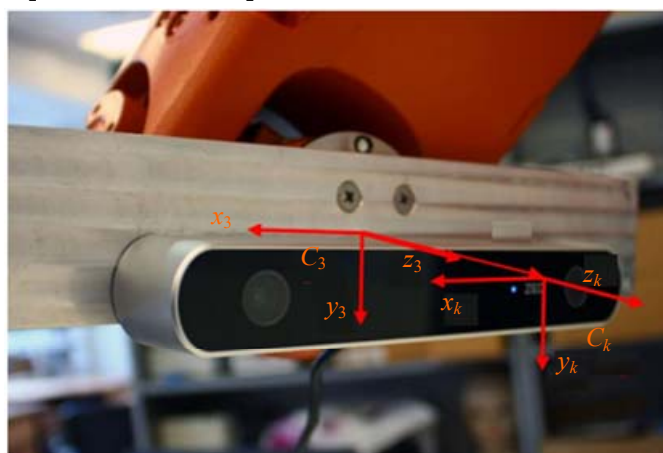


Рис. 4

В начале эксперимента стереокамера манипулятора 2 была выведена в положение, где с ее помощью наблюдалась центральная точка объекта на его верхней крышке: координаты указанной точки в СК C_k определяются вектором $\mathbf{o}'_{ck} = [-46 \quad -174 \quad 521 \quad 1]^T$ (см. рис. 3). Для захвата объекта манипулятором I , согласно предложенному подходу, координаты указанного вектора требовалось перевести из СК C_k в СК C_1 . Для этого сначала обеспечивалось преобразование вектора $\mathbf{o}'_{ck}$ из СК C_k в СК C_2 с помощью выражения $\mathbf{o}'_{c2} = \mathbf{T}_k^2 \mathbf{o}'_{ck} = [476 \quad -4 \quad 41 \quad 1]^T$, затем

из СК C_2 в АСК C_0 с помощью выражения $\mathbf{o}'_{c0} = \mathbf{T}_2^0 \mathbf{o}'_{c2}$ и, наконец, из СК C_0 в СК C_1 с помощью выражения $\mathbf{o}'_{c1} = \mathbf{T}_0^1 \mathbf{o}'_{c0} = [409 \ 4 \ 40 \ 1]^T$. Матрицы соответствующих преобразований, полученные с учетом вектора $\mathbf{k}_3 = [-60 \ 15 \ 10 \ 1]^T$, а также кинематической схемы и параметров конструкции манипулятора 2, имеют следующий вид:

$$\mathbf{T}_k^2 = \begin{bmatrix} -0,508 & 0,572 & 0,644 & 217 \\ 0,422 & -0,487 & 0,765 & -467 \\ 0,751 & 0,66 & 0,006 & 186 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{T}_2^0 = \begin{bmatrix} -0,866 & -0,5 & 0 & 563 \\ 0,5 & 0,866 & 0 & -559 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{T}_1^0 = \begin{bmatrix} -0,866 & -0,5 & 0 & 1093 \\ 0,5 & 0,866 & 0 & -765 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

После решения обратной задачи кинематики для манипулятора 1 и определения конечных значений всех его обобщенных координат был выполнен пробный подход его рабочего органа к объекту. Однако вследствие указанных погрешностей определения расположения объекта в СК C_1 точно подойти к объекту и захватить его не удалось (рис. 5, а). Для компенсации этих погрешностей с помощью ZED-стереокамеры был определен вектор с координатами центральной точки ArUco-маркера $\mathbf{m}'_{ck} = [14 \ -147 \ 544 \ 1]^T$ в СК C_k . Затем этот вектор был последовательно преобразован сначала в СК C_2 : $\mathbf{m}'_{c2} = \mathbf{T}_k^2 \mathbf{m}'_{ck} = [475 \ 26 \ 104 \ 1]^T$, а затем через АСК в СК C_1 : $\mathbf{m}'_{c1} = \mathbf{T}_0^1 \mathbf{T}_2^0 \mathbf{m}'_{c2} = [409 \ -26 \ 104 \ 1]^T$. Однако этот вектор в силу указанных погрешностей отличается от вектора $\mathbf{m}_{c1} = [428 \ -25 \ 96 \ 1]^T$, который соответствует реальному положению центральной точки в СК C_1 , определяемому решением прямой задачи кинематики манипулятора 1 с учетом значений всех его обобщенных координат. Это отличие определяется вектором $\Delta_{c1} = \mathbf{m}_{c1} - \mathbf{m}'_{c1} = [19 \ 1 \ -7 \ 0]^T$ на третьем этапе предложенного алгоритма. Данный вектор на четвертом этапе алгоритма использован для окончательной коррекции координат центральной точки объекта в СК C_1 , которая теперь уже точно определяется вектором $\mathbf{o}_{c1.cor} = \mathbf{o}'_{c1} + \Delta_{c1} = [428 \ 5 \ 33 \ 1]^T$ в этой СК.

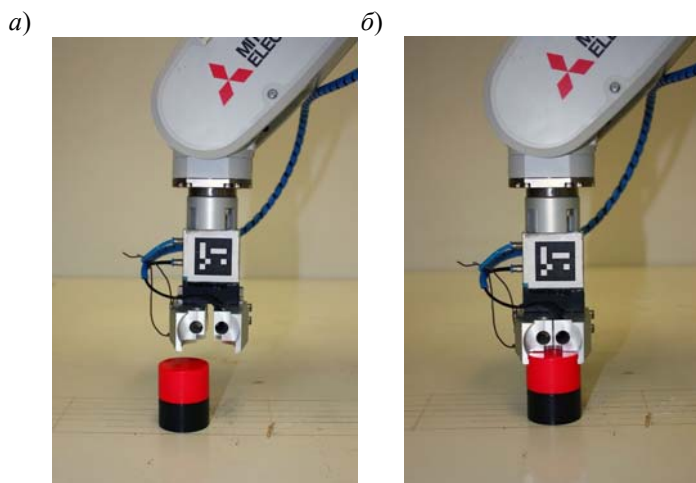


Рис. 5

Для точного подхода схвата манипулятора I к объекту после коррекции координат его расположения в СК C_1 было реализовано дополнительное решение обратной задачи кинематики для устранения выявленной погрешности. Окончательный точный подход манипулятора I к объекту показан рис. 5, б.

Таким образом, результаты экспериментальных исследований полностью подтвердили работоспособность и эффективность предложенного метода согласованной автоматической работы двух МР. При этом обеспечивается точная работа манипулятора даже с объектами, не наблюдаемыми СТЗ основного МР, на котором он установлен, а также удается устранить погрешности в работе как используемых навигационных систем МР, так и их СТЗ.

Заключение. Предложен новый подход, позволяющий обеспечить согласованное взаимодействие двух МР в автоматическом режиме при выполнении различных технологических операций с объектами в стесненных условиях рабочей среды. При этом необходимые операции выполняются с объектами, которые находятся вне зоны видимости СТЗ основного манипуляционного МР, а координаты текущего пространственного положения этих объектов и их ориентации вначале определяются в СК малогабаритного и маневренного вспомогательного МР с помощью его СТЗ. Затем указанные координаты с неминуемыми погрешностями передаются в СК манипуляционного МР и корректируются (уточняются) там по изложенному в статье алгоритму. Результаты экспериментальных исследований подтвердили работоспособность этого алгоритма без использования специальных калибровочных устройств и без выполнения дополнительных тестовых движений. Работоспособность предложенного алгоритма сохраняется и при расположении обоих МР на неровной и негоризонтальной поверхности. Техническая реализация представленного подхода не вызывает принципиальных затруднений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Andreev V. P., Pryanichnikov V. E. Operation Environment of Mobile Robots with Supervision Control // Proc. of the 22nd Intern. DAAAM Symp. Vienna, Austria. 2011. Vol. 22, N 1. P. 0021—0022.
2. Zhang Q., Song B., Cai B., Sun Y. Design of Coordination System for Composite Mobile Robot Platform Oriented to Nuclear Fusion Vessel // J. of Fusion Energy. 2021. N 40(2). P. 22.
3. Wu Y., Balatti P., Lorenzini M., Zhao F., Kim W., Ajoudani A. A teleoperation interface for loco-manipulation control of mobile collaborative robotic assistant // IEEE Robotics and Automation Letters. 2019. N 4(4). P. 3593—3600.
4. Lee D., Spong M. W. Passive bilateral control of teleoperators under constant time-delay // Proc. 16th IFAC World Congress. Prague, Czech Rep. 2005. File 03009.pdf. P. 1—6.
5. Katsurin A. System of Telecontrol by the Mobile Robot with Movable Camera // Applied Mechanics and Materials. 2014. Vol. 643. P. 9—14.
6. Филаретов В. Ф., Кацурун А. А., Пугачев Ю. А. Метод полуавтоматического комбинированного управления манипулятором с помощью подвижной телекамеры // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. № 2. С. 38—45.
7. Филаретов В. Ф., Кацурун А. А. Метод полуавтоматического позиционного управления манипулятором с помощью телекамеры, изменяющей пространственную ориентацию своей оптической оси // Мехатроника, автоматизация, управление. 2008. № 9. С. 15—22.
8. Филаретов В. Ф., Кацурун А. А. Система телеуправления многозвенным манипулятором, установленным на мобильном роботе // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2018. № 12. С. 40—48.
9. Филаретов В. Ф., Юхимец Д. А. Метод формирования гладких траекторий движения мобильных роботов в неизвестном заранее окружении // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2017. № 4. С. 174—184.
10. Филаретов В. Ф., Юхимец Д. А., Мурсалимов Э. Ш. Информационно-управляющая система для мобильных роботов // Автоматика. 2015. Т. 51, № 5. С. 92—100.

11. Xu P., Zheng J., Zhang J., Zhang K., Cui Y., Tang Q. Distributed position-force control for cooperative transportation with multiple mobile manipulators // *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. 2021. Vol. 12690 LNCS. P. 111—118.
12. Mendiburu F. J., Morais M. R. A., Lima A. M. N. Behavior coordination in multi-robot systems // *Proc. IEEE Intern. Conf. on Automatica (ICA-ACCA)*. 2016. P. 1—7.
13. Viegas C., Tavakoli M., Lopes P., Dessi R., De Almeida A. T. SCALA-A scalable rail-based multirobot system for large space automation: Design and development // *IEEE/ASME Trans. on Mechatronics*. 2017. N 22(5). P. 2208—2217.
14. Riccio F., Borzi E., Gemignani G., Nardi D. Multi-robot search for a moving target: Integrating world modeling, task assignment and context // *Proc. IEEE/RSJ Intern. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. 2016. P. 1879—1886.
15. Градецкий В. Г., Ермолов И. Л., Князьков М. М., Лапин Б. С., Семенов Е. А., Собольников С. А., Суханов А. Н. Система группового транспортного управления мобильными наземными роботами на различных грунтах // *Робототехника и техническая кибернетика*. 2020. Т. 8, № 1. С. 61—71.
16. Меркулов В. И. Синтез согласованного управления группой объектов // *Динамика сложных систем — XXI век*. 2016. Т. 10, № 2. С. 23—27.
17. Градецкий В. Г., Ермолов И. Л., Князьков М. М., Семенов Е. А., Собольников С. А., Суханов А. Н. О научных задачах выполнения транспортных операций группой мобильных роботов // *Экстремальная робототехника*. 2016. № 1. С. 25—30.
18. Филаретов В. Ф., Кацурун А. А. Совместная работа двух мобильных роботов при автоматическом выполнении манипуляционных операций // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2018. Т. 19, № 8. С. 529—535.
19. Зенкевич С. Л., Ющенко А. С. Основы управления манипуляционными роботами. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. 480 с.
20. Filaretov V., Yuxhimets D., Zuev A., Gubankov A., Mursalimov E. An new approach for automatization of cutting of flexible items by using multilink manipulators with vision system // *Proc. of the 22nd Intern. Symp. on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM2014)*, Ischia, Italy. 2014. P. 1330—1335.
21. Filaretov V., Katsurin A., Chyi-Yeu Lin. System of Telecontrol by Manipulators for Automatic Grasp of Objects // *Proc. of the Intern. Conf. on Intelligent Computing and Control*. Bangkok, Thailand. 2011. P. 1—4.
22. Cook G., Zhang F. Mobile robots: Navigation, Control and Sensing, Surface Robots and AUVS. Wiley, 2020. P. 1—329.

Сведения об авторах

Владимир Федорович Филаретов

— д-р техн. наук, профессор; Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, лаборатория робототехнических систем; заведующий лабораторией; Дальневосточный федеральный университет, департамент автоматизации и робототехники; директор;
E-mail: filaretov@inbox.ru

Алексей Анатольевич Кацурун

— канд. техн. наук; Дальневосточный федеральный университет, департамент автоматизации и робототехники; Институт проблем морских технологий ДВО РАН, лаборатория интеллектуальных информационных систем для морских роботов; ст. научный сотрудник;
E-mail: katsurin@mail.ru

Поступила в редакцию 04.06.2022; одобрена после рецензирования 27.06.2022; принята к публикации 30.07.2022.

REFERENCES

1. Andreev V.P., Pryanichnikov V.E. *Proceedings of the 22nd International DAAAM Symposium*, Vienna, Austria, 2011, no. 1(22), pp. 0021—0022.
2. Zhang Q., Song B., Cai B., Sun Y. *Journal of Fusion Energy*, 2021, no. 2(40), pp. 22.
3. Wu Y., Balatti P., Lorenzini M., Zhao F., Kim W., Ajoudani A. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2019, no. 4(4), pp. 3593—3600.
4. Lee D., Spong M.W. *Proc. 16 IFAC World Congress*, Prague, Czech Rep., 2005, file 03009.pdf (CD-ROM).
5. Katsurin A. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, vol. 643, pp. 9—14.

6. Filaretov V.F., Katsurin A.A., Pugachev Yu.A. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie* (Mechatronics, Automation, Control), 2009, no. 2, pp. 38–45. (in Russ.)
7. Filaretov V.F., Katsurin A.A. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie* (Mechatronics, Automation, Control), 2008, no. 9, pp. 15–22. (in Russ.)
8. Filaretov V.F., Katsurin A.A. *Information and Control Systems*, 2018, no. 12, pp. 40–48. (in Russ.)
9. Filaretov V.F., Yukhimets D.A. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2017, no. 4(56), pp. 738–748.
10. Filaretov V.F., Yukhimets D.A., Mursalimov E.Sh. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2015, no. 5(51), pp. 505–511.
11. Xu P., Zheng J., Zhang J., Zhang K., Cui Y., Tang Q. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 2021, vol. 12690 LNCS, pp. 111–118.
12. Mendiburu F.J., Morais M.R.A., Lima A.M.N. *Proc. of 2016 IEEE International Conference on Automatica (ICA-ACCA)*, 2016, pp. 1–7.
13. Viegas C., Tavakoli M., Lopes P., Dessi R., De Almeida A.T. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2017, no. 5(22), pp. 2208–2217.
14. Riccio F., Borzi E., Gemignani G., Nardi D. *Proc. of 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2016, pp. 1879–1886.
15. Gradetsky V.G., Ermolov I.I., Knyaz'kov M.M., Lapin B.S., Semenov E.A., Sobol'nikov S.A., Sukhanov A.N. *Robotics and Technical Cybernetics*, 2020, no. 1(8), pp. 61–71. (in Russ.)
16. Merkulov V.I. *Journal Dynamics of Complex Systems - XXI century*, 2016, no. 2(10), pp. 23–27. (in Russ.)
17. Gradetsky V.G., Ermolov I.I., Knyaz'kov M.M., Semenov E.A., Sobol'nikov S.A., Sukhanov A.N. *Extreme Robotics*, 2016, no. 1, pp. 25–30. (in Russ.)
18. Filaretov V.F., Katsurin A.A. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie* (Mechatronics, Automation, Control), 2018, no. 8(19), pp. 529–535. (in Russ.)
19. Zenkevich S.L., Yushchenko A.S. *Osnovy upravleniya manipulyatsionnymi robotami* (Fundamentals of Manipulation Robot Control), Moscow, 2004, 480 p. (in Russ.)
20. Filaretov V., Yukhimets D., Zuev A., Gubankov A., Mursalimov E. *Proc. of 22nd International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM2014)*, Ischia, Italy, 2014, pp. 1330–1335.
21. Filaretov V., Katsurin A., Chyi-Yeu Lin, *Proc. of 2011 International Conference on Intelligent Computing and Control*, Bangkok, Thailand, 2011, pp. 1–4.
22. Cook G., Zhang F. *Mobile robots: Navigation, Control and Sensing, Surface Robots and AUVs*, Wiley, 2020, 329 p.

Data on authors

- | | |
|------------------------------|---|
| Vladimir F. Filaretov | — Dr. Sci., Professor; Institute of Automation and Control Processes of the Far Eastern Branch of the RAS, Laboratory of Robotic Systems; Head of the Laboratory; Far Eastern Federal University, Department of Automation and Robotics; Director; E-mail: filaretov@inbox.ru |
| Alexey A. Katsurin | — PhD; Far Eastern Federal University, Department of Automation and Robotics; Institute of Marine Technology Problems of the Far Eastern Branch of the RAS, Laboratory of Intelligent Information Systems for Marine Robots; Senior Researcher; E-mail: katsurin@mail.ru |

Received 04.06.2022; approved after reviewing 27.06.2022; accepted for publication 30.07.2022.

ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ И НАДЕЖНОСТЬ ПРИБОРОВ И СИСТЕМ

HEAT REGIMES AND RELIABILITY OF INSTRUMENTS AND SYSTEMS

УДК 621.326.7
DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-9-668-676

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

В. П. ХОДУНКОВ^{1*}, Ю. П. ЗАРИЧНЯК²

¹ *Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева,
Санкт-Петербург, Россия
walkerearth@mail.ru

² *Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия*

Аннотация. Рассматриваются два новых метода измерения теплопроводности твердых тел, базирующиеся на использовании абсолютного и относительного измерений исходных тепловых величин, определяющих значение измеряемого параметра. В представленных методах максимально снижено влияние традиционных негативных факторов техники эксперимента на точность получаемых результатов.

Ключевые слова: метод измерения, теплопроводность, электротепловая аналогия, тепловая проводимость, абсолютное измерение, точность, эталон

Ссылка для цитирования: Ходунков В. П., Заричняк Ю. П. Перспективные методы измерения теплопроводности твердых тел // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 9. С. 668—676. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-9-668-676.

PROMISING METHODS FOR MEASURING THE THERMAL CONDUCTIVITY OF SOLIDS

V. P. Khodunkov^{1*}, Yu. P. Zarichnyak²

¹ *D. I. Mendeleev All-Russian Institute for Metrology,
St. Petersburg, Russia
walkerearth@mail.ru

² *ITMO University, St. Petersburg, Russia*

Abstract. Two new methods of measuring the thermal conductivity of solids are considered, based on the use of absolute and relative measurements of the initial thermal quantities that determine the value of the measured parameter. In the presented methods, the influence of traditional negative factors of experimental technique on the accuracy of the results obtained is maximally reduced.

Keywords: measurement method, thermal conductivity, electrothermal analogy, thermal conductivity, absolute measurement, accuracy, standard

For citation: Khodunkov V. P., Zarichnyak Yu. P. Promising methods for measuring the thermal conductivity of solids. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 9. P. 668—676 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-9-668-676.

Введение. Представлены два из четырех новых перспективных методов измерения теплопроводности твердых тел, разработанных авторами настоящей статьи в целях значительно повышения точности с одновременным расширением динамических диапазонов по изме-

ряемой величине [1—4]. При разработке методов были учтены опыт и достижения науки в данной области измерений, которые наиболее полно представлены в работах [5—10].

Первый метод — абсолютный метод дифференциально-сканирующей тепловой кондуктометрии [1]. Предложенный метод, предназначенный для одновременного измерения теплопроводности двух разнородных твердых тел, является стационарным абсолютным методом и не требует наличия эталонного образца, теплопроводность которого заранее и точно известна.

Сущность метода поясняется рис. 1, 2: на рис. 1 представлена тепловая схема измерительной ячейки, реализующей метод, на рис. 2 — пример расчетной зависимости разности мощностей внешних источников теплоты от соотношения толщин образцов, которая используется для определения оптимальных размеров образцов.

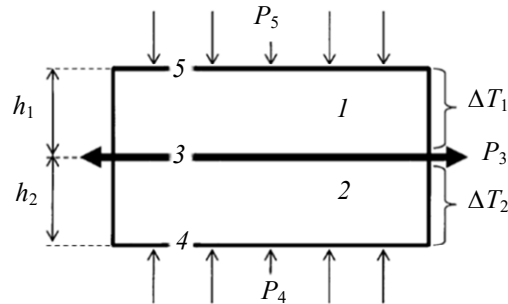


Рис. 1

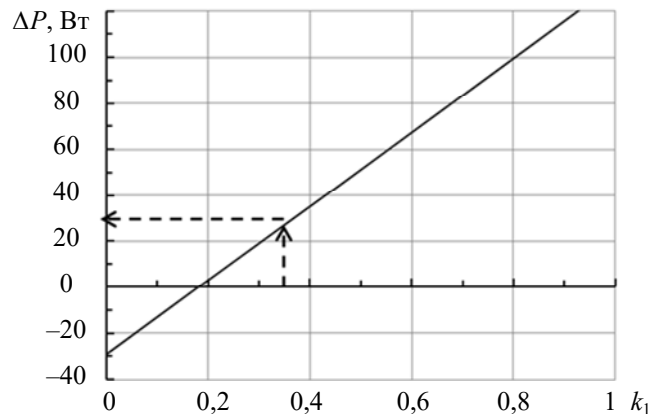


Рис. 2

Измерительная ячейка (см. рис. 1) содержит: 1, 2 — исследуемые образцы, 3 — внутренний сток теплоты, 4, 5 — внешние источники теплоты.

В теоретическую основу метода положена краевая задача теплопроводности для теплообмена двух соприкасающихся тел по закону теплопроводности Фурье с граничными условиями 4-го рода в одномерной постановке:

— уравнение теплопроводности для каждого из тел:

$$q_1 = -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x}; \quad q_2 = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x}; \quad (1)$$

— граничные условия 4-го рода в плоскости соприкосновения образцов с внутренним стоком теплоты:

$$\left. \begin{aligned} T_1 &= T_2 = T_3; \\ -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} &= -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x}, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где λ_1, λ_2 — теплопроводность образцов 1, 2 соответственно; T_1, T_2 — среднеповерхностные температуры образцов 1, 2 в плоскости соприкосновения с внутренним стоком теплоты 3; T_3 — среднеповерхностная температура в плоскости соприкосновения образцов; q_1, q_2 —

стационарный тепловой поток в образцах 1, 2 соответственно; x — координата вдоль толщины образцов.

Уравнения (1), выраженные через тепловые проводимости образцов, имеют вид

$$\left. \begin{aligned} q_1 &= (P_3 - P_5)/S = \sigma_1 \Delta T_1 / S; \\ q_2 &= (P_4 - P_3)/S = \sigma_2 \Delta T_2 / S, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где P_5, P_4 — мощности внешних источников теплоты 5, 4 соответственно; P_3 — мощность внутреннего стока теплоты 3; $\sigma_1 = \lambda_1 S / h_1$ — тепловая проводимость образца 1; $\sigma_2 = \lambda_2 S / h_2$ — тепловая проводимость образца 2; S — площадь поперечного сечения образцов 1, 2; h_1, h_2 — толщины образцов 1, 2 соответственно (при этом принимается, что $h_2 = k_1 h_1$, где k_1 — постоянный коэффициент); ΔT_1 и ΔT_2 — стационарный перепад температуры на образцах 1 и 2 соответственно.

Габаритные размеры образцов 1, 2 выбираются предварительно на основе двух следующих требований:

— разность мощностей внешних источников теплоты 5, 4, при которой достигается равенство стационарных перепадов температуры на образцах 1, 2, должна быть достаточной для ее точного измерения,

— стационарные перепады температуры на образцах 1, 2, достигаемые при равенстве мощностей внешних источников теплоты, должны быть соизмеримы и достаточны для точного измерения, но не должны превышать некоего заданного значения, которое определяется индивидуально; под неким заданным значением перепада температуры понимается такой перепад, в пределах которого фактически происходит осреднение измеряемых значений теплопроводностей.

Для выполнения данных требований используют предварительно получаемые расчетные зависимости разности мощностей внешних источников 5, 4 от соотношения толщин образцов 1, 2, как это показано на рис. 2.

Метод реализуется в два этапа на основе системы уравнений измерения:

$$\lambda_1 = \frac{(P_5^{(1)} - P_4^{(1)}) h_1}{\Delta T_1^{(1)} S (k_1 - N)}; \quad N = \frac{k_1 \Delta T_1^{(2)}}{\Delta T_2^{(2)}}; \quad \lambda_2 = N \lambda_1; \quad k_1 = h_2 / h_1. \quad (4)$$

Вывод уравнений (4) подробно представлен в работе [1], поэтому здесь не приводится.

На первом этапе выполняют компарирование образцов 1, 2 по мощности соответствующих им внешних источников теплоты 5, 4. Для этого при заданной неизменной и стабилизированной во времени мощности P_3 внутреннего стока теплоты 3 путем регулирования мощностей внешних источников теплоты 5, 4 достигают заданного равенства стационарных перепадов температуры $\Delta T_1^{(1)} = \Delta T_2^{(1)}$ на образцах 1 и 2 соответственно. При достижении равенства перепадов измеряют стационарные перепады температуры $\Delta T_1^{(1)} = \Delta T_2^{(1)}$ и соответствующие им мощности внешних источников теплоты $P_5^{(1)}$ и $P_4^{(1)}$. Далее вычисляют разность указанных мощностей, которая, согласно системе уравнений (3), (4), связана с искомыми теплопроводностями следующим соотношением:

$$P_5^{(1)} - P_4^{(1)} = \frac{\Delta T_1^{(1)} S}{h_1} (k_1 \lambda_1 - \lambda_2). \quad (5)$$

На втором этапе выполняют компарирование образцов 1, 2 по стационарным перепадам температуры на них. Для этого при заданной неизменной и стабилизированной мощности P_3 внутреннего стока теплоты 3, которая использовалась на первом этапе, задают равные мощности внешних источников теплоты, например, приравнивают их к мощности одного из внешних источников, установленной на первом этапе измерений, к примеру мощности $P_5^{(1)}$ внешнего источника 5. Таким образом, получают равенство мощностей $P_5^{(2)} = P_4^{(2)} = P_5^{(1)}$. Далее

измеряют достигнутый стационарный перепад температуры $\Delta T_1^{(2)}$ на образце 1 и стационарный перепад температуры $\Delta T_2^{(2)}$ на образце 2. Из системы уравнений (3), (4) выражают разность мощностей внешних источников теплоты 5, 4 и приравнивают ее нулю (так как мощности одинаковые), в результате чего получают уравнение для расчета соотношения теплопроводностей λ_2/λ_1 :

$$\frac{\lambda_2}{\lambda_1} = \frac{k_1 \Delta T_1^{(2)}}{\Delta T_2^{(2)}} = N. \quad (6)$$

Затем совместно решают уравнения (6), (5) относительно теплопроводности λ_1 образца 1, после находят теплопроводность λ_2 образца 2.

Пример реализации первого метода. Пусть, например, требуется измерить априори неизвестные теплопроводности образца из алюминия (образец 1 с теплопроводностью λ_1) и образца из стали (образец 2 с теплопроводностью λ_2). Ожидаемо, что значения указанных теплопроводностей существенно различаются — теплопроводность алюминия выше теплопроводности стали: $\lambda_1 > \lambda_2$. Образцы выполнены в форме параллелепипедов с одинаковыми размерами поперечного сечения, но с разной толщиной h . Формируют измерительную ячейку по схеме, как показано на рис. 1. При этом предварительно определяют оптимальные размеры образцов 1, 2, для чего выполняют расчет зависимостей разности электрических мощностей $\Delta P = P_5^{(1)} - P_4^{(1)}$ от коэффициента $k_1 = h_2/h_1$ в диапазоне $0 < k_1 < 1,0$. Вид данной зависимости для рассматриваемого примера представлен на рис. 2. Для расчета используют соотношение (5) с ожидаемыми значениями теплопроводностей λ_1 и λ_2 . При этом, например, задают следующие исходные расчетные данные:

- размеры образца 1: $h_1 = 20$ мм — толщина, $D_1 = 40$ мм — ширина, $L_1 = 40$ мм — длина, $S_1 = D_1 L_1 = 0,04 \cdot 0,04 = 1,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ — площадь поперечного сечения;
- стационарный заданный перепад температуры $\Delta T_1^{(1)} = 10$ К;
- ожидаемое значение теплопроводности образца 1 — $\lambda_1 \approx 200$ Вт/(м·К);
- ожидаемое значение теплопроводности образца 2 — $\lambda_2 \approx 35$ Вт/(м·К);
- ожидаемое соотношение теплопроводностей $N = \lambda_2/\lambda_1 \approx 0,175$.

В результате расчета по соотношению (5) получают зависимость (см. рис.2), из которой выбирают значение k_1 , при котором разность мощностей ΔP будет достаточной для ее точного измерения, и при этом стационарные перепады температуры на образцах 1, 2, достигаемые при равенстве мощностей внешних источников теплоты, будут соизмеримы (в пределах одного порядка) и достаточны для их точного измерения, но не будут превышать некоторого заданного значения.

Следует заметить, что диапазон выбираемых значений k_1 достаточно широк, главное требование при выборе конкретного значения k_1 — разность мощностей ΔP должна быть достаточной для ее точного измерения.

Например, из полученной зависимости (см. рис. 2) выбирают значение коэффициента $k_1 = 0,35$. Этому значению k_1 соответствует разность мощностей $\Delta P \approx 30$ Вт, что вполне достаточно для ее точного измерения. Для получения расчетного соотношения для ожидаемого значения перепада температуры $\Delta T_2^{(2)}$ используют уравнение (6), в котором принимают равенство перепадов температуры $\Delta T_1^{(1)} = \Delta T_2^{(1)}$ (в рассматриваемом примере $\Delta T_1^{(1)} = \Delta T_2^{(1)} = 10$ К):

$$\Delta T_2^{(2)} = \frac{k_1 \Delta T_1^{(2)}}{N} = \frac{0,35 \cdot 10}{35/200} = 20 \text{ К}.$$

Полученное значение стационарного перепада температуры $\Delta T_2^{(2)} = 20$ К соизмеримо со стационарным перепадом температуры $\Delta T_1^{(1)} = 10$ К на образце 1, что соответствует сформулированному выше требованию. Исходя из выбранного значения коэффициента k_1 с учетом

соотношений (4) задают размеры образца 2: $h_2=k_1h_1=0,35\cdot 20=7$ мм — толщина, $D_2=40$ мм — ширина, $L_2=40$ мм — длина, $S_2=D_2L_2=0,04\cdot 0,04=1,6\cdot 10^{-3}$ м² — площадь поперечного сечения.

Необходимо отметить, что на практике иногда не представляется возможным оценить даже ожидаемые значения теплопроводностей. В данной ситуации имеются два варианта решения проблемы:

— первый вариант — оценить значения теплопроводностей образцов экспериментально одним из наиболее простых известных методов, при этом не требуется особой точности измерений, после чего рассчитать необходимую толщину образцов и реализовать предлагаемый метод;

— второй вариант — выполнить предварительный эксперимент согласно представленному методу, при этом взять образцы одинаковой толщины, после чего, исходя из экспериментальных данных, скорректировать размеры образцов до нужных толщин, при которых будут обеспечены требуемые значения разности мощностей и перепадов температуры.

После определения необходимой толщины образцов изготавливают образцы 1, 2 и собирают измерительную ячейку, как показано на рис. 1. Затем, согласно первому этапу, выполняют компарирование образцов 2 и 1 по мощности соответствующих им внешних источников теплоты 4, 5, указанные мощности измеряют. В результате получают значения, например, $P_5^{(1)}=45,4$ Вт и $P_4^{(1)}=14,8$ Вт, при которых достигаются одинаковые стационарные перепады температуры $\Delta T_1^{(1)}=\Delta T_1^{(2)}=10$ К. Затем, согласно второму этапу, выполняют компарирование образцов 2 и 1 по их стационарным перепадам температуры, которые также измеряют. В результате получают измеренные значения, например, $\Delta T_1^{(2)}=10$ К и $\Delta T_2^{(2)}=20,8$ К, которые соответствуют равенству мощностей $P_5^{(2)}=P_4^{(2)}=P_5^{(1)}$. Далее выполняют расчет искомых теплопроводностей, для чего используют систему уравнений (4):

$$\left. \begin{aligned} \lambda_1 &= \frac{(P_5^{(1)} - P_4^{(1)})h_1}{\Delta T_1^{(1)}S(k_1 - N)} = \frac{(45,4 - 14,8)0,02}{10 \cdot 1,6 \cdot 10^{-3}(0,35 - 0,1683)} = 210; \\ N &= \frac{k_1\Delta T_1^{(2)}}{\Delta T_2^{(2)}} = \frac{0,35 \cdot 10}{20,8} \approx 0,17; \\ \lambda_2 &= N\lambda_1 = 0,1683 \cdot 210,5 = 35,4, \\ k_1 &= h_2/h_1 = 0,35. \end{aligned} \right\}$$

Таким образом, согласно предложенному методу измерены следующие значения теплопроводностей: теплопроводность стали — $\lambda_2=35,4$ Вт/(м·К), теплопроводность алюминия — $\lambda_1=210$ Вт/(м·К).

Метод позволяет одновременно измерять теплопроводность сразу двух различных по теплофизическим свойствам образцов, т.е. обеспечивает операцию кондуктометрического сканирования, что выгодно и существенно отличает его от известных методов.

Оценка погрешности первого метода. Наилучшую достижимую относительную погрешность измерения теплопроводности $\delta\lambda$, номинально обеспечиваемую предложенным методом, в общем виде оценивают по соотношению

$$\delta\lambda = \left(\left(\delta P_5^{(1)} \right)^2 + \left(\delta P_4^{(1)} \right)^2 + \delta^2 \left(\Delta T_1^{(1)} \right) + \delta^2 \left(\Delta T_1^{(2)} \right) + \delta^2 \left(\Delta T_2^{(2)} \right) + \delta^2 S + \delta^2 h \right)^{1/2}, \quad (7)$$

где δ — символ, означающий относительную погрешность измерения физической величины.

Основной вклад в погрешность вносит измерение перепада температуры на образцах, остальные составляющие — погрешности измерения электрической мощности и размеров образцов — пренебрежимо малы (не менее чем на порядок меньше погрешности измерения температуры). В настоящее время относительная достигнутая погрешность данных парамет-

ров составляет $\delta P_5^{(1)} \approx \delta S \approx \delta h \approx 5 \cdot 10^{-5} = 0,005 \%$. С учетом этого соотношение (7) преобразуется к виду

$$\delta \lambda \approx (3\delta^2(\Delta T_1^{(1)}))^{1/2}. \quad (8)$$

Погрешность измерения перепада температуры определяется относительной погрешностью номинальных статических характеристик используемых контактных термопреобразователей. Так, например, для платиновых термометров сопротивления 1-го разряда расширенная абсолютная неопределенность при 0°C составляет $\Delta_1 = 0,002$ К. Для примера зададим значения измеряемых перепадов температуры $\Delta T = \Delta T_1 = 10$ К. Допустим, что каждый из перепадов температуры измеряется с помощью двух термометров сопротивления. С учетом этого соотношение (8) трансформируется к виду

$$\delta \lambda \approx \left(6\delta^2(T)\right)^{1/2} = \left(6\delta^2\left(\frac{\Delta_1}{\Delta T}\right)\right)^{1/2},$$

где $\delta(T) = \Delta_1/\Delta T$ — относительная погрешность измерения температуры поверхности образцов; для принятых исходных данных $\Delta_1 = 0,002$ К, $\Delta T = \Delta T_1 = 10$ К получаем $\delta \lambda \approx 5 \cdot 10^{-4} = 0,05 \%$.

Безусловно, при конкретной реализации метода фактическая погрешность будет всегда выше приведенной оценки и в каждом отдельном случае должна определяться индивидуально в зависимости от качества исполнения используемого устройства.

Второй метод — относительный метод измерения теплопроводности [2] является частным случаем первого метода и предназначен для дифференциально-сканирующей кондуктометрии, т.е. для измерений теплопроводности твердых тел путем их компарирования с мерой, теплопроводность которой заранее точно известна. Метод ориентирован на применение в метрологии и может быть использован в государственной поверочной схеме средств измерений теплопроводности твердых тел.

Назначение данного метода — обеспечение возможности компарирования теплопроводностей двух материалов с высокой точностью и в широком динамическом диапазоне.

Сущность метода поясняется рис. 3, на котором представлена принципиальная схема измерений, осуществляемых при компарировании теплопроводностей исследуемого и эталонного образцов: 1 — эталонный образец, 2 — исследуемый образец, 3 — охлаждаемое основание, 4, 5 — нагревательные элементы, 6, 7 — теплоизоляционные пластины; стрелками показано направление теплового потока через образцы 1, 2 и в охлаждаемом основании 3.

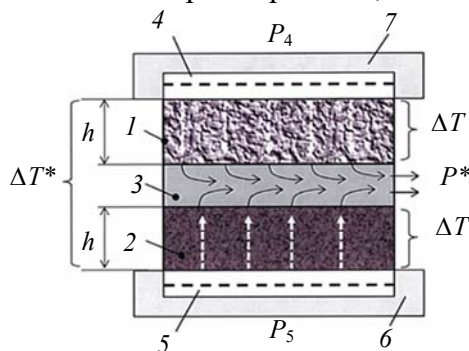


Рис. 3

При компарировании теплопроводностей используют два плоских образца 1, 2 с идентичными габаритными размерами и заданной формой, например два цилиндра или два параллелепипеда. При этом теплопроводность эталонного образца 1, или меры теплопроводности, известна с высокой (эталонной) точностью, а теплопроводность исследуемого образца 2 априори неизвестна. Данные образцы устанавливают на охлаждаемое основание 3 с двух его противоположных сторон, а на внешних плоскостях образцов устанавливают нагревательные элементы 4 и 5 соответственно.

Нагревательные элементы 4, 5 представляют собой пластины с встроенными в них электрическими нагревателями. Охлаждаемое основание 3 и нагревательные элементы 4, 5 выполняют из высокотеплопроводного материала, например из меди, что необходимо для обеспечения наиболее равномерного температурного поля в наружных плоскостях образцов. Кроме того, наружные части каждого из нагревательных элементов 4, 5, не соприкасающиеся с образцами, наилучшим образом теплоизолируют от окружающей среды с помощью теплоизоляционных пластин 6, 7. Это необходимо для того, чтобы вся выделяющаяся в нагревательном элементе электрическая мощность без каких-либо потерь передавалась к образцу. При этом сводят к минимуму контактное тепловое сопротивление между образцами 1, 2 и охлаждающим основанием 3, между образцами 1, 2 и соответствующими им нагревательными элементами 4, 5.

Таким образом, в результате выполнения указанных операций формируется измерительная ячейка для компарирования теплопроводностей двух образцов. Далее задается некое значение стационарного перепада температуры ΔT , которого необходимо достичь на толщине h каждого из образцов 1, 2 (см. рис. 3). При фиксированной стабилизированной мощности охлаждения P^* путем регулирования электрических мощностей P_4 , P_5 достигают одинаковых стационарных перепадов температуры ΔT на образцах. В этом случае соотношения, связывающие электрическую мощность нагревательного элемента с теплопроводностью соответствующего образца и с перепадом температуры на нем, имеют следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} P_4 &= \sigma_1 \Delta T = \lambda_1 S \Delta T / h; \\ P_5 &= \sigma_2 \Delta T = \lambda_2 S \Delta T / h; \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

где λ_1 и λ_2 — теплопроводность эталонного и исследуемого образцов соответственно; S — площадь торцевой поверхности (плоскости контакта) образцов 1, 2; $\lambda_1 S/h = \sigma_1$ — тепловая проводимость эталонного образца 1; $\lambda_2 S/h = \sigma_2$ — тепловая проводимость исследуемого образца 2; P_4 — электрическая мощность нагревательного элемента 4, состыкованного с эталонным образцом 1; P_5 — электрическая мощность нагревательного элемента 5, состыкованного с исследуемым образцом 2.

Из системы уравнений (9) следует, что отношение теплопроводностей образцов λ_1/λ_2 прямо пропорционально отношению соответствующих им электрических мощностей нагревательных элементов, т.е. $\lambda_1/\lambda_2 = P_4/P_5$. Отсюда следует, что теплопроводность исследуемого образца может быть определена по соотношению

$$\lambda_2 = \lambda_1 P_5 / P_4,$$

которое является уравнением измерения.

Оценка неопределенности второго метода. Оценка выполнена аналогично первому методу и дает значение 0,02 %. Предложенный метод минимизирует количество нежелательных контактных тепловых сопротивлений, количество применяемых средств измерений температуры, длительность измерений и обработки получаемых результатов, обеспечивает высокую точность, прост в реализации и использовании, чем выгодно отличается от известных методов.

Заключение. Представлен новый абсолютный метод дифференциально-сканирующей тепловой кондуктометрии, который обеспечивает одновременное измерение теплопроводности сразу двух различных по теплофизическим свойствам образцов, т.е. обеспечивает операцию кондуктометрического сканирования, что выгодно и существенно отличает его от известных методов. В методе используется система из двух измеряемых тел. Оцениваемая погрешность метода $\approx 0,05$ %.

Разработан новый относительный метод измерения теплопроводности, который предназначен для дифференциально-сканирующей кондуктометрии — для измерений теплопроводности твердых тел путем их компарирования с мерой теплопроводности. Метод ориентирован на при-

менение в метрологии и может быть использован в государственной поверочной схеме средств измерений теплопроводности твердых тел. Оцениваемая погрешность метода $\approx 0,02\%$.

Представленные методы, по мнению авторов, имеют высокий потенциал для реализации и могут быть успешно использованы при создании новых высокоточных средств измерения теплопроводности. Данные методы взаиморавноправны по применению и обеспечиваемой ими точности, какой метод использовать предпочтительнее — определяет пользователь с учетом специфики условий и задач измерения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. 2755090 РФ, МПК G01N 25/18. Абсолютный способ дифференциально-сканирующей тепловой кондуктометрии / В. П. Ходунков, Ю. П. Заричняк. Оpubл. 15.09.2021. Бюл. № 26.
2. Пат. 2755330 РФ, МПК G01N 25/18. Способ измерения теплопроводности / В. П. Ходунков. Оpubл. 15.09.2021. Бюл. № 26.
3. Пат. 2749642 РФ, МПК G01N 25/18. Абсолютный способ дифференциально-сканирующей кондуктометрии разнородных твердых материалов / В. П. Ходунков, Ю. П. Заричняк. Оpubл. 16.06.2021. Бюл. № 17.
4. Пат. 2752398 РФ, МПК G01N 25/18. Способ совокупного измерения теплопроводности разнородных твердых материалов и устройство для его осуществления / В. П. Ходунков. Оpubл. 27.07.2021. Бюл. № 21.
5. Кондратьев Г. М. Тепловые измерения. Л.: Машгиз, 1957. 244 с.
6. Балабанов П. В., Савенков А. П. Теоретические и практические аспекты измерения теплофизических свойств гетерогенных материалов: Монография. Тамбов: ТГТУ, 2016. 188 с.
7. Теоретические и практические аспекты теплофизических измерений: Монография / С. В. Пономарев, С. В. Мищенко, А. Г. Дивин. Тамбов: ТГТУ, 2006. Кн. 1. 204 с.
8. Теоретические и практические основы теплофизических измерений / Под ред. С. В. Пономарева. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 408 с.
9. Теплофизические измерения: учеб. пособие / Е. С. Платунов, И. В. Баранов, С. Е. Буравой, В. В. Курепин; под ред. Е. С. Платунова. СПб: СПбГУН и ПТ, 2010. 738 с.
10. Фокин В. М., Бойков Г. П., Видин Ю. В. Основы технической теплофизики. М.: Машиностроение, 2004. 172 с.

Сведения об авторах

Вячеслав Петрович Ходунков

— канд. техн. наук; Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева, информационно-аналитический отдел, отдел эталонов и научных исследований в области термодинамики; ст. научный сотрудник, E-mail: walkerearth@mail.ru

Юрий Петрович Заричняк

— д-р физ.-мат. наук, профессор; Университет ИТМО, факультет энергетики и экотехнологий; E-mail: zarich@ifmo.ru

Поступила в редакцию 31.05.2022; одобрена после рецензирования 29.06.2022; принята к публикации 30.07.2022.

REFERENCES

1. Patent RU 2755090, G01N 25/18, *Absolyutnyy sposob differentsial'no-skaniruyushchey teplovoy konduktometrii* (Absolute Method of Differential Scanning Thermal Conductometry), V.P. Khodunkov, Yu.P. Zarichnyak, Patent application no. 2020138452, Priority 23.11.2020, Published 15.09.2021, Bulletin 26. (in Russ.)
2. Patent RU 2755330, G01N 25/18, *Sposob izmereniya teploprovodnosti* (Method for Measuring Thermal Conductivity), V.P. Khodunkov, Patent application no. 2020138455, Priority 23.11.2020, Published 15.09.2021, Bulletin 26. (in Russ.)
3. Patent RU 2749642, G01N 25/18, *Absolyutnyy sposob differentsial'no-skaniruyushchey konduktometrii raznorodnykh tverdykh materialov* (Absolute Method of Differential Scanning Conductometry of Dissimilar Solid Materials), V.P. Khodunkov, Yu.P. Zarichnyak, Patent application no. 2020138458, Priority 23.11.2020, Published 16.06.2021, Bulletin 7. (in Russ.)
4. Patent RU 2752398, G01N 25/18, *Sposob sovokupnogo izmereniya teploprovodnosti raznorodnykh tverdykh materialov i ustroystvo dlya yego osushchestvleniya* (Method for the Combined Measurement of Thermal Conductivity of Dissimilar Solid Materials and a Device for Its Implementation), V.P. Khodunkov, Patent application no. 2020138460, Priority 23.11.2020, Published 27.07.2021, Bulletin 21. (in Russ.)

5. Kondrat'yev G.M. *Teplovyye izmereniya* (Thermal Measurements), Leningrad, 1957, 244 p. (in Russ.)
6. Balabanov P.V., Savenkov A.P. *Teoreticheskiye i prakticheskiye aspekty izmereniya teplofizicheskikh svoystv geterogennykh materialov* (Theoretical and Practical Aspects of Measuring the Thermophysical Properties of Heterogeneous Materials), Tambov, 2016, 188 p. (in Russ.)
7. Ponomarev S.V., Mishchenko S.V., Divin A.G. *Teoreticheskiye i prakticheskiye aspekty teplofizicheskikh izmereniy* (Theoretical and Practical Aspects of Thermophysical Measurements), Tambov, 2006, Book 1, 204 p. (in Russ.)
8. Ponomarev S.V., ed., *Teoreticheskiye i prakticheskiye osnovy teplofizicheskikh izmereniy* (Theoretical and Practical Foundations of Thermophysical Measurements), Moscow, 2008, 408 p. (in Russ.)
9. Platunov E.S., Baranov I.V., Buravoy S.E., Kurepin V.V. *Teplofizicheskiye izmereniya* (Thermophysical Measurements), St. Petersburg, 2010, 738 p. (in Russ.)
10. Fokin V.M., Boykov G.P., Vidin Yu.V. *Osnovy tekhnicheskoy teplofiziki* (Fundamentals of Technical Thermophysics), Moscow, 2004, 172 p. (in Russ.)

Data on authors

- | | | |
|--------------------------------|---|--|
| Vyacheslav P. Khodunkov | — | PhD; D. I. Mendeleev All-Russian Institute for Metrology, Information and Analytical Department, Department of Standards and Research in the Field of Infrared Radiometry and Applied Pyrometry; Senior Researcher,
E-mail: walkerearth@mail.ru |
| Yuriy P. Zarichnyak | — | Dr. Sci., Professor; ITMO University, Faculty of Energy and Ecotechnology;
E-mail: zarich@grv.ifmo.ru |

Received 31.05.2022; approved after reviewing 29.06.2022; accepted for publication 30.07.2022.

МОДЕЛЬ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОГО СИНТЕЗА
ОБЪЕДИНЕННОЙ ФУНКЦИИ РАСКРЫВА
РАЗНЕСЕННЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК

А. П. АЛЕШКИН¹, П. В. САВОЧКИН¹, А. В. ЧЕСТНЫХ², С. Н. БАЛАКИРЕВ^{1*}

¹Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия
*vka@mil.ru

²Научно-исследовательский институт дальней радиосвязи, Москва, Россия

Аннотация. Представлена методика сужения диаграммы направленности антенны, базирующаяся на совместной пространственно-временной обработке сигналов, принимаемых в последовательные моменты времени разнесенными в пространстве приемными антенными решетками квазимоностатической декаметровой радиолокационной системы дальнего обнаружения. Применение методики позволяет повысить вероятность обнаружения объектов, находящихся за пределами прямой видимости, на фоне мощных мешающих помех, обусловленных как средой распространения, так и отражениями от подстилающей поверхности. Реализация методики позволит повысить достоверность определения объектов, лоцируемых декаметровыми радиолокационными системами.

Ключевые слова: антенная решетка, подстилающая поверхность, амплитудно-фазовое распределение, пространственно-временная обработка, диаграмма направленности, волновой фронт

Ссылка для цитирования: Аleshkin А. П., Savochkin П. В., Chestnykh А. В., Balakirev С. Н. Модель пространственно-временного синтеза объединенной функции раскрыва разнесенных антенных решеток // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 9. С. 677—684. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-9-677-684.

MODEL OF SPATIAL-TEMPORAL SYNTHESIS
OF THE COMBINED APERTURE FUNCTION
OF SPACED ANTENNA ARRAYS

A. P. Aleshkin¹, P. V. Savochkin¹, A. V. Chestnykh², S. N. Balakirev^{1*}

¹A. F. Mozhaitsky Military Space Academy, St. Petersburg, Russia,
*vka@mil.ru

²Research Institute of Long-Range Radio Communication, Moscow, Russia

Abstract. A technique for narrowing the antenna pattern based on joint spatial-temporal processing of signals received at successive moments of time by spatially separated receiving antenna arrays of a quasi-monostatic decimeter early warning radar system is presented. The technique application makes it possible to increase the probability of detecting objects located outside the line of sight against the background of powerful interfering interference caused by both the propagation medium and reflections from the underlying surface. The implementation of the methodology will improve the reliability of determining objects located by decimeter radar systems.

Keywords: antenna array, underlying surface, amplitude-phase distribution, spatial-temporal processing, radiation pattern, wave front

For citation: Aleshkin A. P., Savochkin P. V., Chestnykh A. V., Balakirev S. N. Model of spatial-temporal synthesis of the combined aperture function of spaced antenna arrays. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 9. P. 677—684 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-9-677-684.

Введение. На сегодняшний день особый интерес в области радиолокации представляют системы, способные осуществлять локацию объектов, находящихся за пределами горизонта, что имеет важное практическое значение в труднодоступных районах, где отсутствует необходимая инфраструктура для размещения радиолокационных средств прямой видимости.

Возрастающие требования к достоверности и точности получаемой радиолокационной информации об исследуемых объектах обуславливают необходимость применения новых подходов как к построению радиолокационных систем (РЛС), так и к обработке принимаемых сигналов.

Применение декаметровых РЛС позволяет наблюдать за объектами, которые расположены вблизи земной поверхности и находятся на значительных расстояниях, за счет отражения зондирующего сигнала и отраженного от ионосферы сигнала, что недоступно для РЛС прямой видимости. С другой стороны, вследствие используемого диапазона и значительной дальности лоцирования достоверность обнаружения объектов декаметровыми РЛС заметно снижается, как и разрешающая способность [1—4].

Особенностью загоризонтного обнаружения является большая зона облучения подстилающей поверхности, определяемая шириной диаграммы направленности (ДН) передающей антенной решетки (АР), которая может достигать десятков квадратных километров. Это приводит к тому, что в сложных условиях фоновой обстановки без дополнительной информации, т.е. доплеровской обработки, и при уменьшении мощности отражаемого от подстилающей поверхности сигнала обнаружение объекта становится затруднительным. Наряду с этим ширина диаграммы направленности приемной АР определяет отношение сигнал/шум на ее входе, что также приводит к ухудшению достоверности обнаружения объектов лоцирования и снижению разрешающей способности по азимуту. Все это определяет необходимость поиска путей сужения диаграммы направленности приемной антенны [5—9].

Существует несколько способов решения данной задачи. Один из них — увеличение продольных размеров приемной АР. Рассматриваемая АР в силу специфики используемого диапазона длин волн имеет значительные продольные размеры, поэтому дальнейшее их увеличение приведет к росту экономических затрат и обострению проблемы обеспечения пространственной когерентности принимаемого сигнала.

Другой путь основан на применении методов сверхразрешения, таких как MUSIC, ESPRIT, MVDR и т.п., которые позволяют получить улучшенные вероятностные оценки лоцирования объектов. Однако эти методы чувствительны к искажениям волнового фронта принимаемого сигнала, которые в используемом диапазоне существенны и неизбежны из-за быстрой переменчивости состояния ионосферы [10—12].

Одним из альтернативных способов решения данной проблемы является переход от однопозиционной радиолокационной системы к квазимоностатической, позволяющей повысить достоверность локационных измерений за счет увеличения отношения сигнал/шум благодаря совместной обработке сигналов, принятых последовательно во времени на разнесенные в пространстве приемные позиции. Применение подобной архитектуры построения приемной антенны с использованием пространственно-временного синтеза объединенной функции раскрыва позволит рассматривать ее как единую АР [13—15].

Постановка задачи. Пусть на приемную антенну радиолокационной системы поступает совокупность сигналов, в которой присутствуют отраженный от лоцируемого объекта сигнал и сигналы от подстилающей поверхности и других объектов, окружающих цель. Кроме того, на приемную антенну воздействуют помехи и шумы естественного и искусственного происхождения. Площадь участка пространства, облучаемого зондирующим сигналом, в десятки раз превышает площадь лоцируемого объекта. В этих условиях отношение сигнал/шум в приемной АР РЛС всегда меньше единицы, и уровень шумов превышает уровень полезного сигнала на 40—60 дБ. Пусть объект находится на одинаковом удалении от фазовых центров раз-

несенных приемных АР при условии стационарности канала распространения сигнала, тогда падающий волновой фронт на элементы АР можно считать эквифазным. Если с определенной степенью точности, которая зависит от искажения этих эквифазных поверхностей, восстановить амплитудно-фазовое распределение между разнесенными в пространстве элементами приемной АР, то можно сформировать ДН с шириной, эквивалентной линейным размерам синтезированной АР.

Реализация модели пространственно-временного синтеза. Рассмотрим способ реализации предложенного подхода к построению квазимоностатической радиолокационной системы дециметрового диапазона. На рис. 1 представлен один из вариантов рассматриваемой системы. При такой конфигурации передающий модуль располагается посередине между приемными, находящимися друг от друга на удалении, при котором параметры среды распространения можно считать с определенной погрешностью идентичными, и выполняется условие пространственной когерентности принимаемого сигнала.

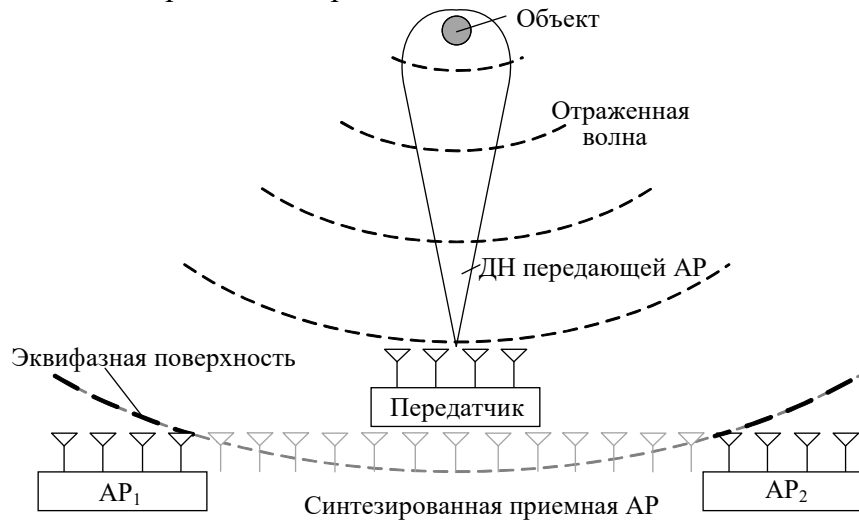


Рис. 1

Построение пространственно-когерентного квазимоностатического комплекса загоризонтного обнаружения позволяет рассматривать приемную систему в целом как единую АР. В этом случае появляется возможность сформировать узконаправленную виртуальную диаграмму направленности всего радиолокационного комплекса как результат совместной обработки массива данных, полученных последовательно во времени от каждой из приемных АР.

Пусть имеются две разнесенные АР (AP_1 , AP_2), состоящие из n однотипных элементов i с расстоянием d между ними и расположенные вдоль оси x . Представим лоцируемый объект точечным источником, расположенным на одинаковом удалении от фазовых центров обеих АР. От объекта распространяется отраженный сигнал, представляющий собой плоскую монохроматическую волну, описываемую выражением

$$S(t, r) = a \exp[j(2\pi ft + \nu r)],$$

где a — случайная комплексная амплитуда; t — время; $r = xi + yj + zk$ — пространственная переменная, i , j , k — векторы направленности прихода сигнала; f — частота во временной области; $\nu = \nu_x i + \nu_y j + \nu_z k$ — волновой вектор (пространственная частота).

Эта волна распространяется со скоростью, пропорциональной

$$\nu = \frac{2\pi f}{|\nu|},$$

в направлении, характеризуемом волновым вектором. Данная волна принимается АР. Сигнал, принимаемый на элементах решетки, расположенных вдоль оси x , определяется следующим выражением:

$$S_x(t, x) = a \exp[j(2\pi ft + v_x x)].$$

Этот сигнал позволяет определить направление на его источник. Причем известно, что скорость распространения волны постоянна и является функцией от частоты. Соответственно волновое число можно определить по формуле

$$|v| = \frac{2\pi f}{v}.$$

На практике информация о параметрах среды распространения, например ионосфере, отсутствует и соответственно невозможно однозначно выяснить направление прихода волны.

Существует возможность определить угол наклона θ волнового фронта (рис. 2) и тем самым определить направление на объект:

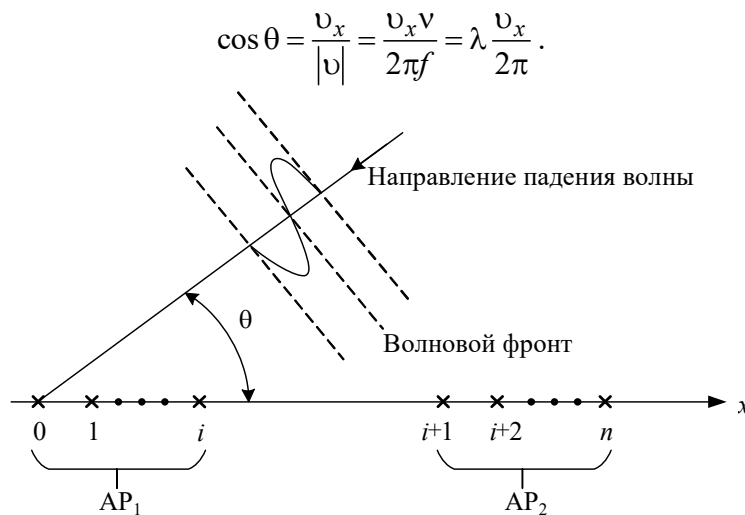


Рис. 2

Определить угол наклона волнового фронта на одной АР с достаточной точностью затруднительно из-за ее небольших энергетических характеристик. Если интерполировать волновой фронт между двумя приемными АР на основе амплитудно-фазового распределения (АФР) сигнала, принятого элементами этих решеток, то можно сформировать ДН синтезированной АР, линейные и соответственно энергетические характеристики которой будут определяться координатами $\{0, n\}$. Расстояние между самими решетками должно быть кратно расстоянию между элементами d . Тогда сигнал на выходе i -го элемента в каждый момент времени будет определяться выражением

$$f_x(id) = a \exp\left(\frac{2\pi nd \cos \theta}{\lambda}\right).$$

Совокупность пространственных выборок на выходах элементов АР представляет собой мгновенный отклик решетки на падающую электромагнитную волну с пространственной частотой

$$\omega_{\text{пр}} = v_x d = \frac{2\pi d \cos \theta}{\lambda}.$$

Оценка пространственной частоты при известном значении λ позволяет оценить направление прихода данной волны.

Применение пространственно-временного синтеза позволяет сформировать объединенную функцию раскрыва разнесенных АР (рис. 3). В результате можно сформировать три ДН: ДН AP_1 , ДН AP_2 и ДН синтезированной АР. Это, в свою очередь, позволит снизить влияние шумов подстилающей поверхности на сигнал, отраженный от цели, за счет уменьшения областей совместной зоны засветки (рис. 4).

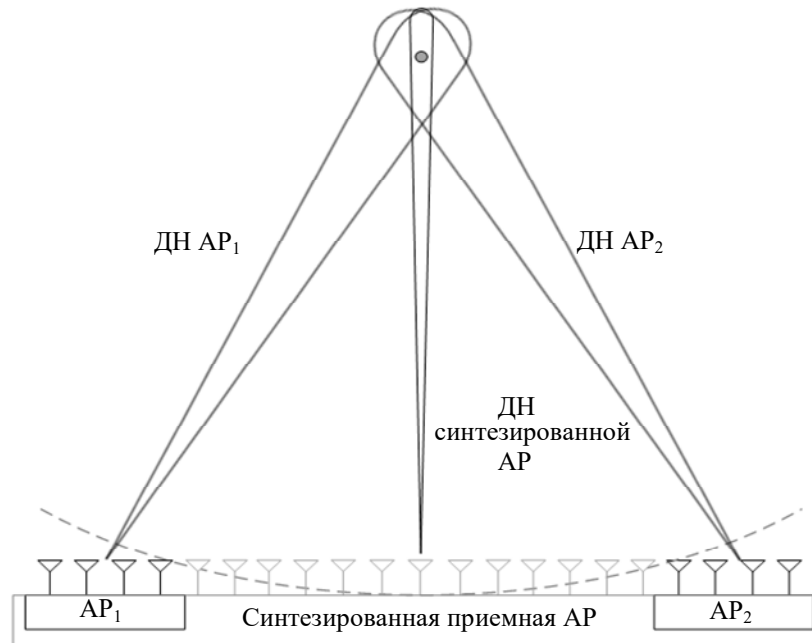


Рис. 3

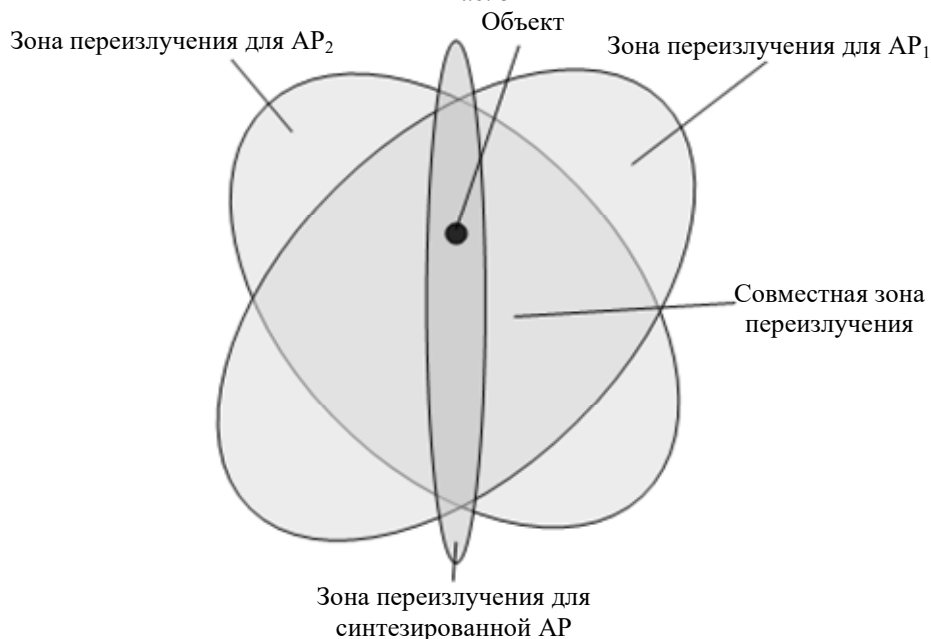


Рис. 4

Результаты моделирования. Математическое моделирование было организовано при следующих исходных данных: $\lambda=20$ м, $n=10$, $d=\lambda/2=10$ м, расстояние между фазовыми центрами антенных решеток — 40 км.

На рис. 5, а, б представлены ДН исходных антенных решеток AP_1 и AP_2 при квазимоно-статическом построении радиолокационной системы коротковолнового диапазона при отсутствии шумов и угле фазирования, равном 0° и 10° соответственно.

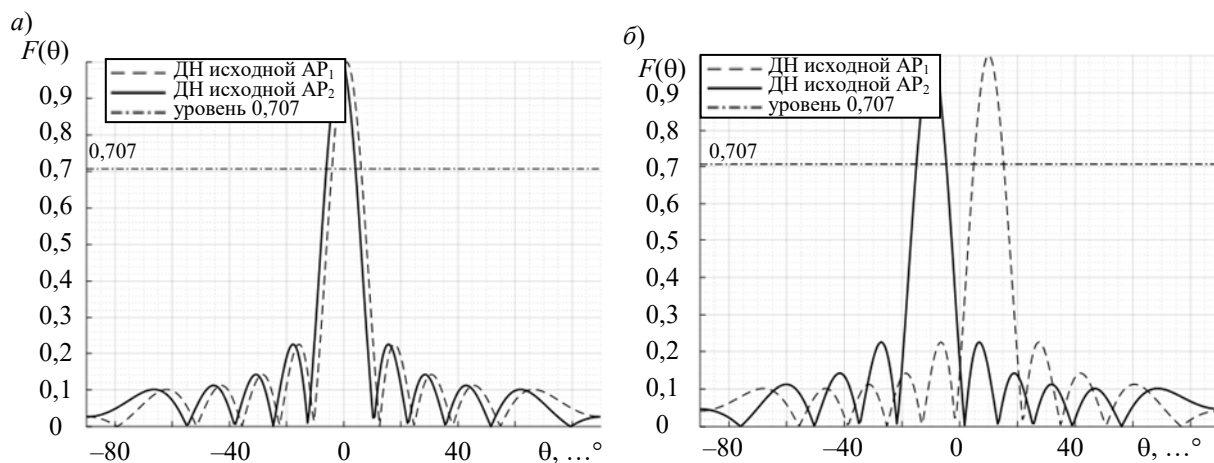


Рис. 5

Как видно из графиков, в результате пространственно-временного синтезирования АР ширина ДН сужается по уровню 0,707 с 10 до 0,5°, что, в свою очередь, повышает достоверность и точность получаемой радиолокационной информации об исследуемых объектах.

На рис. 6, а, б представлены ДН синтезированных АР, рассчитанные при угле фазирования 0° и 10° и при наличии шумов, которые имитируют искажения фазового распределения на элементах АР. СКО искажений было принято равным 5°. Анализ рисунков показывает, что предложенная методика работает даже при наличии шумов, выражающихся в искажении волнового фронта падающей электромагнитной волны на элементы приемной антенны.

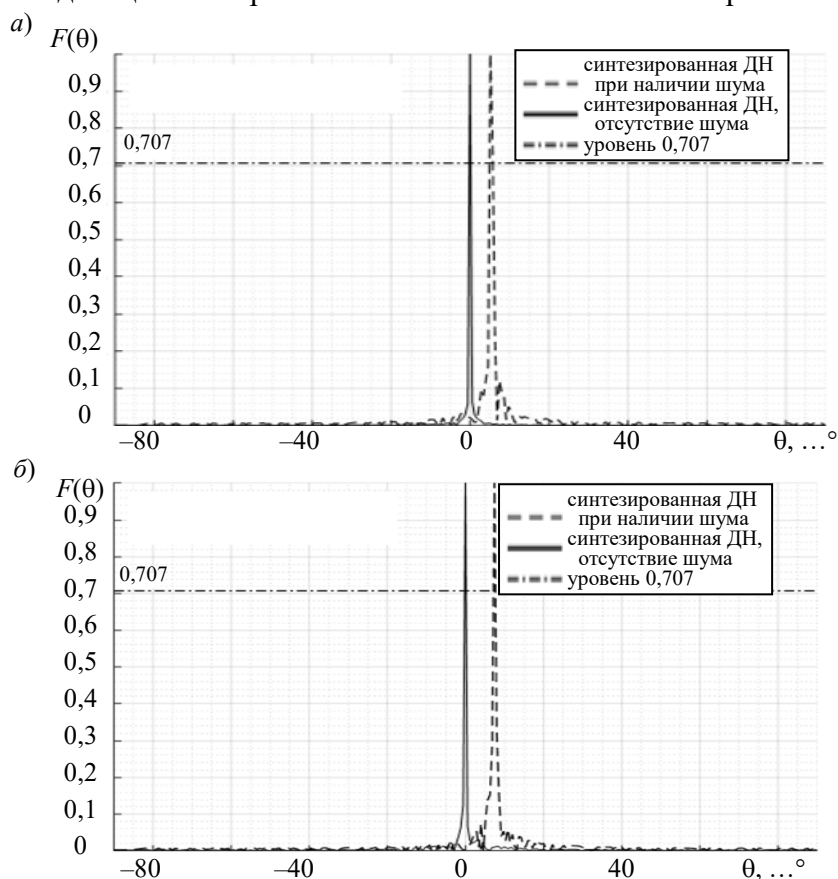


Рис. 6

Заключение. Построение приемной АР в виде разнесенных в пространстве модулей и совместная пространственно-временная обработка выполняемых ими измерений позволяет синтезировать АР с размерами, намного превышающими линейные размеры самих антенн. Это позволяет сузить ДН синтезированной АР, тем самым увеличить энергетические пара-

метры приемной антенны и повысить достоверность и точность получаемой радиолокационной информации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Фабрицио Д. А.* Высокочастотный загоризонтный радар: основополагающие принципы, обработка сигналов и практическое применение / Пер. с англ.; Под ред. *С. Ф. Боева*. М.: Техносфера, 2018. 936 с.
2. *Акимов В. Ф., Калинин Ю. К.* Введение в проектирование ионосферных загоризонтных радиолокаторов / Под ред. *С. Ф. Боева*. М.: Техносфера, 2017. 492 с.
3. *Акимов В. Ф., Калинин Ю. К., Слукин Г. П.* Проблемы загоризонтного радиолокационного обнаружения и пути их преодоления // Вестн. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Серия „Приборостроение“. 2012. № 3. С. 5—17.
4. *Алебастров В. А., Борсоев В. А., Шустов Э. И.* Развитие отечественной загоризонтной радиолокации М.: Новое время, 2016. 248 с.
5. *Ратынский М. В.* Адаптация и сверхразрешение антенных решеток. М.: Радио и связь, 2003. 197 с.
6. *Вендик О. Г., Калинин С. А., Козлов Д. С.* Фазированная антенная решетка с управляемой формой диаграммы направленности // ЖТФ. 2013. Т. 83, № 10. С. 117—121.
7. *Алешкин А. П., Владимиров В. В., Савочкин П. В.* Методика оценки влияния характеристик загоризонтной радиолокационной станции на результативность обнаружения наземной цели на фоне подстилающей поверхности // Тр. Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского. 2019. Вып. 671. С. 91—97.
8. *Чистяков В. А., Куприц В. Ю.* Сверхразрешение в антенных решетках // Решетневские чтения (Томск. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники). 2016. Т. 1. С. 310—312.
9. *Алешкин А. П., Балакирев С. Н., Невзоров В. И., Савочкин П. В.* Повышение эффективности обнаружения загоризонтными РЛС с поверхностной волны надводных объектов на основе синтеза апертуры антенной системы // Информатика и автоматизация. 2021. №1 (20). С. 68—93.
10. Справочник по радиолокации / Пер. с англ.; Под ред. *М. И. Сколника*. М.: Техносфера, 2014. Кн. 2. 680 с.
11. Теоретические основы радиолокации: учеб. пособие для вузов / *А. А. Коростелев, Н. Ф. Клюев, Ю. А. Мельник, А. А. Веретягин, В. А. Губин, В. Е. Дулевич, Ю. С. Зиновьев, А. В. Петров*; Под ред. *В. Е. Дулевича*. М.: Сов. радио, 1978. 608 с.
12. Теоретические основы радиолокации: учеб. пособие для вузов / *Я. Д. Ширман, В. Н. Голиков, И. Н. Бусыгин, Г. А. Костин, В. Н. Манжос, Н. Н. Минервин, Б. В. Найденов, В. И. Поляков, А. С. Челпанов*; Под ред. *Я. Д. Ширмана*. М.: Сов. радио, 1970. 560 с.
13. *Порсев В. И., Гелесев А. И., Красько А. Г.* Угловое сверхразрешение сигналов с использованием „виртуальных“ антенных решеток // Вестн. Концерна ВКО „Алмаз — Антей“. 2019. № 4. С. 24—34.
14. *Дмитриев Д. Д., Карцан И. Н.* Адаптивные антенные решетки с цифровым формированием луча // Решетневские чтения (Томск. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники). 2016. Т. 1. С. 263—265.
15. *Лаговский Б. А.* Сверхразрешение на основе синтеза апертуры цифровыми антенными решетками // Антенны. 2013. № 6 (193). С. 9—16.

Сведения об авторах

- | | |
|---------------------------------------|---|
| Андрей Петрович Алешкин | — д-р техн. наук, профессор; ВКА им. А. Ф. Можайского, факультет радиоэлектронных систем космических комплексов; E-mail: vka@mil.ru |
| Павел Владимирович Савочкин | — канд. техн. наук, доцент; ВКА им. А. Ф. Можайского, факультет радиоэлектронных систем космических комплексов; E-mail: vka@mil.ru |
| Александр Владимирович Честных | — Научно-исследовательский институт дальней радиосвязи, научно-тематический центр-3; начальник; E-mail: achestnyh@niidar.ru |
| Станислав Николаевич Балакирев | — адъюнкт; ВКА им. А. Ф. Можайского, факультет радиоэлектронных систем космических комплексов; E-mail: vka@mil.ru |

Поступила в редакцию 21.06.2022; одобрена после рецензирования 29.06.2022; принята к публикации 30.07.2022.

REFERENCES

1. Fabrizio D. *High Frequency Over-the-Horizon Radar: Fundamental Principles, Signal Processing, and Practical Applications*, 2013.
2. Akimov V.F., Kalinin Yu.K. *Vvedeniye v proyektirovaniye ionosfernykh zagorizontnykh radiolokatorov* (Introduction to the Design of Ionospheric Over-the-Horizon Radars), Moscow, 2017, 492 p. (in Russ.)
3. Akimov V.F., Kalinin Yu.K., Slukin G.P. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Instrument Engineering*, 2012, no. 3, pp. 5–17. (in Russ.)
4. Alebastrov V.A., Borsoyev V.A., Shustov E.I. *Razvitiye otechestvennoy zagorizontnoy radiolokatsii* (Development of Domestic Over-the-Horizon Radar), Moscow, 2016, 248 p., ISBN 978-5-9908744-8-0. (in Russ.)
5. Ratynskiy M.V. *Adaptatsiya i sverkhrazresheniye antennoykh reshetok* (Adaptation and Superresolution of Antenna Arrays), Moscow, 2003, 197 p. (in Russ.)
6. Vendik O.G., Kalinin S.A., and Kozlov D.S. *Technical Physics*, 2013, no. 10(83), pp. 1507–1511.
7. Aleshkin A.P., Vladimirov V.V., Savochkin P.V. *Proceedings of the Mozhaisky Military Space Academy*, 2019, no. 671, pp. 91–97. (in Russ.)
8. Chistyakov V.A., Kuprits V.Yu. *Reshetnevskiy chteniye* (Reshetnev Readings), Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 2016, vol. 1, pp. 310–312. (in Russ.)
9. Aleshkin A., Balakirev S., Nevzorov V., Savochkin P. *Informatics and Automation*, 2021, no. 1(20), pp. 68–93 (in Russ.)
10. Skolnik M. *Radar Handbook*, The McGraw-Hill Companies, 2008, 1351 p.
11. Korostelev A.A., Klyuev N.F., Melnik Yu.A., Veretyagin A.A., Gubin V.A., Dulevich V.E., Zinoviev Yu.S., Petrov A.V. *Teoreticheskiye osnovy radiolokatsii* (Theoretical Foundations of Radar), Moscow, 1978, 608 p. (in Russ.)
12. Shirman Ya.D., Golikov V.N., Busygin I.N., Kostin G.A., Manzhos V.N., Minervin N.N., Naydenov B.V., Polyakov V.I., Chelpanov A.S. *Teoreticheskiye osnovy radiolokatsii* (Theoretical Foundations of Radar), Moscow, 1970, 560 p. (in Russ.)
13. Porsev V.I., Gelesev A.I., Krasko A.G. *Bulletin of the Concern VKO "Almaz-Antey"*, 2019, no. 4, pp. 24–34. (in Russ.)
14. Dmitriev D. D., Kartsan I. N. *Reshetnevskiy chteniye* (Reshetnev Readings), Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 2016, vol. 1, pp. 263–265. (in Russ.)
15. Lagovskiy B.A. *Antenny*, 2013, no. 6(193), pp. 9–16. (in Russ.)

Data on authors

- | | |
|--------------------------------|---|
| Andrey P. Aleshkin | — Dr. Sci., Professor; A. F. Mozhaisky Military Space Academy, Faculty of Radio-Electronic Systems of Space Complexes; E-mail: vka@mil.ru |
| Pavel V. Savochkin | — PhD, Associate Professor; A. F. Mozhaisky Military Space Academy, Faculty of Radio-Electronic Systems of Space Complexes; E-mail: vka@mil.ru |
| Aleksander V. Chestnykh | — Research Institute of Long-Range Radio Communication, 3 rd Scientific-Thematic Center, Head of the Center; E-mail: achestnyh@niidar.ru |
| Stanislav N. Balakirev | — Adjunct; A. F. Mozhaisky Military Space Academy, Faculty of Radio-Electronic Systems of Space Complexes; E-mail: vka@mil.ru |

Received 21.06.2022; approved after reviewing 29.06.2022; accepted for publication 30.07.2022.

РАСЧЕТ ДЛИТЕЛЬНОСТИ НАБЛЮДЕНИЯ ПРИ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СЪЕМКЕ

В. В. ЗАЙЦЕВ

Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия
vka@mil.ru

Аннотация. Предложен математический подход к расчету длительности съемки с борта космического аппарата, оборудованного радиолокатором с синтезированной апертурой антенны, для оценивания потенциальных возможностей системы наблюдения. Геометрия съемки радиолокатором характеризуется системой из трех уравнений: наклонной дальности, эллипсоида вращения и доплеровской частоты принимаемого сигнала, которые задаются в трехмерной инерциальной системе координат, связанной с Землей. Данная система уравнений не имеет явного решения, поэтому предлагается вариант решения задачи по выявлению аналитической связи между параметрами, характеризующими положение космического аппарата на траектории, значениями углов его разворота и углов отклонения диаграммы направленности антенны, параметрами зондирующих импульсов. Для упрощения решения предполагается местная сферичность Земли в районе съемки с известным локальным радиусом. Определение длительности съемки требуется для выбора необходимого режима работы радиолокатора в целях получения радиолокационного изображения района наблюдения с требуемым разрешением в пределах заданной полосы захвата. Представлена методика планирования съемки района наблюдения радиолокатором на основе расчета ее длительности. Получены соотношения, позволяющие оценить возможности радиолокатора при решении задач съемки или при проектировании системы наблюдения, а также определить обоснованные требования к выбору основных характеристик радиолокатора и баллистических параметров группировки космических аппаратов.

Ключевые слова: длительность съемки, радиолокационная съемка, режим съемки, параметры съемки, космическая система наблюдения, радиолокатор с синтезированной апертурой антенны, радиолокационная фотограмметрия

Ссылка для цитирования: Зайцев В. В. Расчет длительности наблюдения при радиолокационной съемке // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 9. С. 685—695. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-9-685-695.

CALCULATION OF OBSERVATION PERSISTENCE DURING RADAR SURVEY

V. V. Zaytsev

A. F. Mozhaitsky Military Space Academy, St. Petersburg, Russia
vka@mil.ru

Abstract. A mathematical approach is proposed to calculate the duration of survey by a spacecraft equipped with a synthetic aperture radar to assess the potential capabilities of the observation system. The geometry of the radar survey is characterized by a system of three equations governing the slant range, the rotation ellipsoid, and the Doppler frequency of the received signal, which are specified in a three-dimensional inertial coordinate system associated with the Earth. This system of equations does not have an explicit solution, therefore, a variant of solving the problem of identifying the analytical relationship between the parameters characterizing the position of the spacecraft on the trajectory and the angles of its rotation, the angles of deflection of the antenna pattern, and the parameters of probing pulses is proposed. To simplify the solution, the local sphericity of the Earth is assumed in the survey area with a known local radius. Determination of the survey duration is required to select the necessary radar operation mode in order to obtain a radar image of the observation area with the wanted resolution within a given capture band. A technique for planning an area survey with a radar based on calculation of the observation duration is presented. Relationships are obtained that make it possible to evaluate the capabilities of a radar in solving survey problems or in designing a surveillance system, as well as to determine reasonable requirements for choosing the main characteristics of a radar and ballistic parameters of a spacecraft constellation.

Keywords: observation duration, space surveillance system, synthetic aperture radar, radar survey, survey mode, survey parameters, photogrammetry

For citation: Zaytsev V. V. Calculation of observation persistence during radar survey. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 9. P. 685—695 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-9-685-695.

Введение. Среди технологий дистанционного зондирования Земли выделяются космические радиолокационные системы наблюдения (КРЛСН). Данные системы характеризуются различными режимами съемки радиолокатором с синтезированной апертурой антенны (РСА). Основными геометрическими режимами съемки РСА являются следующие [1].

1. Режим нормальной боковой (маршрутной) съемки — детальный непрерывный режим (stripmap), при реализации которого максимум диаграммы направленности (ДН) антенны в процессе выполнения съемки ориентирован под постоянным углом к траектории движения космического аппарата (КА).

2. Режим максимального разрешения — детальный прожекторный режим (spotlight), при реализации которого съемка осуществляется с использованием электронного программного разворота антенны в азимутальной плоскости, а радиолокационное (РЛ) изображение представляется в виде компактного кадра местности.

3. Широкозахватный режим — обзорный режим (scanSAR), при реализации которого съемка осуществляется с использованием электронного сканирования ДН антенны в вертикальной плоскости. Получаемое РЛ-изображение представляет собой набор парциальных кадров, из которых формируется полоса захвата по поверхности Земли вдоль маршрута движения КА.

Важной задачей при эксплуатации КА является выбор режима съемки для наблюдения конкретного района при планировании включений РСА, разработки программ управления КА и наведения антенны с сохранением требуемого качества получаемых системой РЛ-изображений.

При текущем планировании съемки с использованием КА [2] на основе анализа задач, стоящих перед КРЛСН, выделяется перечень районов наблюдения, которые характеризуются положением на земной поверхности (координатами, превышением) и линейными размерами (шириной и протяженностью относительно трассы предполагаемого движения КА). Для объектов съемки задаются требования к качеству получаемых РЛ-изображений: предельные значения пространственного разрешения по дальности ΔR и азимуту ΔX , которые, в свою очередь, определяют используемый режим съемки и параметры зондирующих импульсов.

Для обеспечения условия однозначного приема отраженных сигналов и получения изображения требуемого качества в перечисленных выше режимах съемки РСА используется сложная геометрия наблюдения, когда выполняется наведение антенны на требуемую дальность по углу крена и осуществляется отклонение ДН антенны по азимуту (углу рыскания). Угол отклонения ДН по рысканию также компенсирует набег доплеровской частоты отраженного сигнала, который возникает за счет вращения Земли и разворотов КА при детальном и широкозахватном режимах съемки.

Возможности выбора конкретного режима съемки района наблюдения в заданный момент времени нахождения КА на траектории характеризуются зоной захвата (полосой съемки) в продольном и поперечном направлениях, в которой возможно получение отраженных сигналов с требуемыми параметрами, и полосой обзора (полосой возможного перенацеливания), в которой может быть выбрана зона захвата. Для РСА, кроме общих ограничений, связанных с обеспечением заданного потенциала радиолокационной съемки, существуют принципиальные ограничения по выбору зоны захвата. Ограничения обеспечивают однозначное воспроизведение спектра доплеровских частот принимаемого сигнала, определяемого конструктивными параметрами антенны и требуемым разрешением по азимуту. Указанное противоречие разрешается путем выбора оптимальных параметров функционирования РСА (частоты повторения зондирующих импульсов) и способов компенсации смещения центральной доплеровской частоты отраженных сигналов.

Важным параметром съемки является интервал времени нахождения РСА над районом наблюдения (длительность съемки), при котором обеспечиваются условия однозначного приема отраженных сигналов. Длительность наблюдения характеризует возможности системы по много-

кратной съемке района за один пролет, количество возможных перенацеливаний ДН антенны в широкозахватном режиме, время накопления сигнала при обеспечении максимального разрешения в прожекторном режиме. Анализ публикаций показывает, что пути решения задачи по расчету длительности съемки с использованием РСА освещены и проработаны не в полной мере, что проявляется в отсутствии соответствующего математического аппарата [3—11].

Таким образом, цель настоящей статьи — решение задачи расчета длительности съемки с учетом влияния ее геометрических условий. Для достижения цели предлагается решение задачи по выявлению аналитической связи между параметрами, характеризующими положение КА на траектории, значениями углов разворота КА и углов отклонения ДН антенны и параметрами зондирующих импульсов, что требуется для выбора необходимого режима съемки и получения РЛ-изображений района наблюдения с требуемым разрешением в пределах заданной полосы захвата.

Модель расчета длительности наблюдения. Пусть район наблюдения имеет линейную протяженность вдоль трассы L_p и, соответственно, угловую протяженность $\eta = L_p / R_3$, где R_3 — локальный радиус Земли (рис. 1).

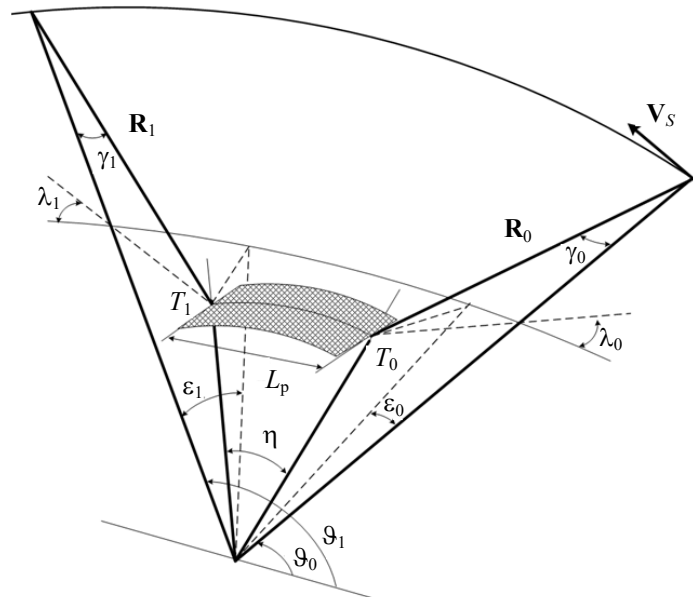


Рис. 1

Район ограничен начальной и конечной точками объекта T_0 и T_1 на поверхности Земли для середины полосы захвата. Длительность наблюдения t_s определяется временем движения КА по орбите вдоль объекта с учетом углового наведения антенны на требуемую наклонную дальность и возможных предельных отклонений антенны по азимуту с соблюдением качества РЛ-изображения: пространственного разрешения и обеспечения однозначного приема отраженных сигналов. Точкам T_0 и T_1 соответствуют истинные аномалии ϑ_0 и ϑ_1 КА. Тогда длительность наблюдения можно вычислить по интегральной формуле [12]

$$t_s = \int_{\vartheta_0}^{\vartheta_1} \frac{1}{\omega} d\vartheta = p^{3/2} \mu^{-1/2} \int_{\vartheta_0}^{\vartheta_1} (1 + e \cos \vartheta)^{-2} d\vartheta, \quad (1)$$

где $\omega_s = p^{-3/2} \mu^{1/2} (1 + e \cos \vartheta)^2$ — угловая скорость движения КА относительно центра Земли; $p = (R_3 + H_A)(1 - e)$ — фокальный параметр орбиты; μ — геоцентрическая постоянная поля тяготения Земли; $e = (H_A - H_P) / (H_A + H_P + 2R_3)$ — эксцентриситет орбиты; H_A и H_P — высота апогея и перигея орбиты соответственно.

В свою очередь, уравнение (1) может быть представлено в виде

$$t_s = p^{3/2} \mu^{-1/2} \left\{ \left[e \sin \vartheta / (e^2 - 1)(1 + e \cos \vartheta) + 2(1 - e^2)^{-3/2} \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \arctg((1 - e)^{1/2} (1 + e)^{-1/2} \operatorname{tg}(\vartheta / 2)) \right] \right|_{\vartheta_0}^{\vartheta_1} \Bigg\}.$$

Истинная аномалия ϑ_0 определяется через начальную высоту съемки H_0 :

$$\vartheta_0 = \arccos((p - R_3 - H_0) / e(R_3 + H_0)),$$

а аномалия ϑ_1 — из уравнения

$$\vartheta_1 - \vartheta_0 = \varepsilon_0 + \varepsilon_1 + L_p / R_3,$$

где ε_0 и ε_1 — центральные углы в плоскости орбиты.

Углы ε_0 и ε_1 рассчитываются в системе координат (СК), связанной с носителем через углы ориентации вектора наклонной дальности γ_0 и λ_0 , γ_1 и λ_1 :

$$\varepsilon_0 = \arcsin\left(\frac{R_0 \sin \gamma_0 \cos \lambda_0}{R_3}\right), \quad \varepsilon_1 = \arcsin\left(\frac{R_1 \sin \gamma_1 \cos \lambda_1}{R_3}\right),$$

где γ_0 и γ_1 — углы крена КА в начальной и конечной точках наблюдения, задающие положение полосы наблюдения относительно орбиты КА при действующей временной задержке отраженного сигнала и наклонной дальности; λ_0 и λ_1 — углы отклонения вектора наклонной дальности по азимуту, определяемые скоростью взаимного перемещения КА и района наблюдения, значениями угловых разворотов антенны и КА и, соответственно, доплеровским смещением частоты отраженного сигнала; R_0 и R_1 — наклонная дальность.

Для определения данной зависимости необходимо разработать фотограмметрическую модель РЛ-изображения, связывающую координаты точек местности и снимка.

Фотограмметрическая модель РЛ-изображения. В заданный момент времени положение КА и его движение описываются в принятой СК радиус-вектором $\mathbf{R}_S = (X_S, Y_S, Z_S)$ и вектором скорости $\mathbf{V}_S = (V_{S_x}, V_{S_y}, V_{S_z})$ на основе прогноза орбитального движения КА (рис. 2). При использовании РСА ориентация вектора наклонной дальности отраженного сигнала определяется как результат пересечения фронта падающей волны и земного эллипсоида с учетом смещения частоты отраженного сигнала, возникающего из-за взаимного перемещения КА и района наблюдения.

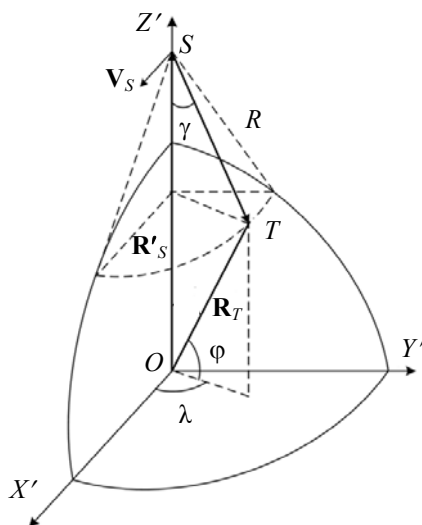


Рис. 2

Координаты (X_T, Y_T, Z_T) точки T на поверхности Земли задаются уравнением эллипсоида вращения в экваториальной инерциальной СК:

$$\frac{X_T^2 + Y_T^2}{(R_e + h)^2} + \frac{Z_T^2}{R_p^2} = 1,$$

где R_e и R_p — экваториальный и полярный радиусы земного эллипсоида соответственно; h — превышение района съемки над поверхностью эллипсоида.

Наклонная дальность R описывается уравнением сферы:

$$(X_S - X_T)^2 + (Y_S - Y_T)^2 + (Z_S - Z_T)^2 = X^2 + Y^2 + Z^2 = R^2.$$

Доплеровская частота f_d отраженного сигнала зависит от результата произведения векторов наклонной дальности и его скорости [13] или векторов положения носителя ($\mathbf{R}_S$) и цели ($\mathbf{R}_T$) и их скорости [14]:

$$\frac{f_d l_b R}{2} = (\mathbf{R}_S - \mathbf{R}_T)(\mathbf{V}_S - \mathbf{V}_T),$$

где l_b — длина волны излучения РСА; $\mathbf{V}_T$ — вектор скорости движения объекта на поверхности Земли на широте района наблюдения в экваториальной инерциальной СК.

Составляющие вектора скорости $\mathbf{V}_T$ определяются по следующей формуле:

$$\mathbf{V}_T(V_{T_x}, V_{T_y}, V_{T_z}) = \begin{bmatrix} -Y_T \omega_e \\ X_T \omega_e \\ 0 \end{bmatrix},$$

где $\omega_e = 7,2292115 \cdot 10^{-5}$ рад/с — угловая скорость вращения Земли.

Прямая задача определения положения точки на поверхности Земли не может быть решена в явном виде. Обычно используются численные методы решения системы уравнений эллипсоида, наклонной дальности и доплеровской частоты отраженного сигнала [15] относительно координат цели X_T, Y_T, Z_T в экваториальной инерциальной СК, в которой обычно выполняется баллистический прогноз движения КА.

Однако при допущении о локальной сферичности Земли в районе наблюдения с известным для данной широты средним радиусом кривизны R_T положение района на поверхности эллипсоида в барицентрической СК [16] (см. рис. 2) можно задать через направляющие косинусы вектора $\mathbf{R}_T$:

$$X'_T = k_1 R_T; Y'_T = k_2 R_T; Z'_T = k_3 R_T,$$

где $k_1 = \cos \varphi \cos \lambda$, $k_2 = \cos \varphi \sin \lambda$, $k_3 = \sin \varphi$; φ , λ — углы в сферической СК.

Координаты вектора $\mathbf{R}'_T(X'_T, Y'_T, Z'_T)$ в барицентрической СК преобразуются в геоцентрическую инерциальную СК по формулам

$$\begin{bmatrix} X_T \\ Y_T \\ Z_T \end{bmatrix} = [n_{i,j}] \cdot \begin{bmatrix} X'_T \\ Y'_T \\ Z'_T \end{bmatrix},$$

где $[n_{i,j}]$ — матрица поворота, характеризуемая параметрами орбиты КА.

Элементы матрицы поворота определяются составляющими вектора площадей $\mathbf{C}$ [16]:

$$[n_{i,j}] = \begin{bmatrix} \frac{1}{CR_S}(C_2Z_S - C_3Y_S) & \frac{C_1}{C} & \frac{X_S}{R_S} \\ \frac{1}{CR_S}(C_3X_S - C_1Z_S) & \frac{C_2}{C} & \frac{Y_S}{R_S} \\ \frac{1}{CR_S}(C_1Y_S - C_2X_S) & \frac{C_3}{C} & \frac{Z_S}{R_S} \end{bmatrix},$$

где C_1, C_2, C_3 — компоненты вектора площадей с модулем $C = \sqrt{C_1^2 + C_2^2 + C_3^2}$.

Согласно второму закону Кеплера, постоянная площадей вычисляется в результате векторного произведения $\mathbf{C} = \mathbf{R}_S \times \mathbf{V}_S$ с модулем $C = R_S V_S \sin Q$ и углом между векторами $\mathbf{R}_S$ и $\mathbf{V}_S$. Параметр Q рассчитывается по формуле

$$Q = \arccos \left(\frac{X_S V_{S_x} + Y_S V_{S_y} + Z_S V_{S_z}}{R_S V_S} \right).$$

Компоненты вектора площадей $\mathbf{C} = (C_1, C_2, C_3)$ определяются по известным соотношениям [6]

$$C_1 = Y_S V_{S_z} - Z_S V_{S_y}, C_2 = Z_S V_{S_x} - X_S V_{S_z}, C_3 = X_S V_{S_y} - Y_S V_{S_x}.$$

Положение точки T определяется через сферические координаты следующим образом:

$$X_T = R_T [n_{11}k_1 + n_{12}k_2 + n_{13}k_3];$$

$$Y_T = R_T [n_{21}k_1 + n_{22}k_2 + n_{23}k_3];$$

$$Z_T = R_T [n_{31}k_1 + n_{32}k_2 + n_{33}k_3],$$

где n_{xx} — элементы матрицы поворота в барицентрической СК.

Данное уравнение удовлетворяет всем точкам окружности с полярным углом γ . Угол φ можно выразить через угол обзора следующим образом (см. рис. 2):

$$\varphi = \arccos \left(\frac{R_S \sin \gamma}{R_T} \right).$$

В этом случае зависимость доплеровской частоты f_d от углов ориентации γ, λ вектора наклонной дальности в барицентрической СК имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} f_d = \frac{2}{l_B R} \{ & X_S V_{S_x} + Y_S V_{S_y} + Z_S V_{S_z} + \\ & + R \sin \gamma \cos \lambda [(-V_{S_x} - \omega_e Y_S) n_{11} - (V_{S_y} - \omega_e X_S) n_{21} - V_{S_z} n_{31}] + \\ & + R \sin \gamma \sin \lambda [(-V_{S_x} - \omega_e Y_S) n_{12} - (V_{S_y} - \omega_e X_S) n_{22} - V_{S_z} n_{32}] + \\ & + (R_T^2 - R^2 \sin^2 \gamma)^{1/2} [(-V_{S_x} - \omega_e Y_S) n_{13} - (V_{S_y} - \omega_e X_S) n_{23} - V_{S_z} n_{33}] \}. \end{aligned}$$

Полученное выражение преобразуется к квадратному уравнению, которое может быть решено относительно неизвестного λ :

$$\cos^2 \lambda \cdot (N_1^2 + N_2^2) + \cos \lambda \cdot (2N_1 N_0) + (N_0^2 - N_2^2) = 0, \quad (2)$$

где

$$\begin{aligned} N_1 &= R_T \cos \varphi [(-V_{S_x} - \omega_e Y_S) n_{11} - (V_{S_y} - \omega_e X_S) n_{21} - V_{S_z} n_{31}]; \\ N_2 &= R_T \cos \varphi [(-V_{S_x} - \omega_e Y_S) n_{12} - (V_{S_y} - \omega_e X_S) n_{22} - V_{S_z} n_{32}], \\ N_0 &= R_T \sin \varphi [(-V_{S_x} - \omega_e Y_S) n_{13} - (V_{S_y} - \omega_e X_S) n_{23} - V_{S_z} n_{33}] + \\ &\quad + \frac{I_b f_d R}{2} + X_S V_{S_x} + Y_S V_{S_y} + Z_S V_{S_z}. \end{aligned}$$

Уравнение (2) определяет ориентацию вектора наклонной дальности, параметры принимаемого сигнала в зависимости от вектора положения КА, его скорости и положения объекта съемки на поверхности Земли; в дальнейшем это уравнение можно использовать при планировании съемки.

Анализ точности модели. Основными факторами, влияющими на точность предложенной модели, являются погрешности определения вектора положения и вектора скорости КА, а также параметров элементов внешнего ориентирования. Перечисленные факторы могут быть формализованы и сведены к 11 варьируемым параметрам, определяющим точность модели в фиксированные моменты времени РЛ-съемки.

Предлагается учесть случайный характер отклонений реальных значений параметров от расчетных. Один из методов, позволяющий определить основные статистические характеристики, — метод статистических испытаний Монте-Карло [17]. Выходными величинами при использовании метода Монте-Карло являются дисперсия, среднеквадратическое отклонение, математическое ожидание исследуемого компонента или суммарное значение ошибки.

Для космической РЛ-съемки с трехосной ориентацией в пространстве основные варьируемые параметры могут быть сгруппированы следующим образом: составляющие вектора скорости; составляющие вектора положения; три значения угла, характеризующие положение линии визирования в пространстве, — тангаж, крен, рыскание; наклонная дальность; отклонение превышения участка местности от заданного значения.

Основные этапы имитационного моделирования космической РЛ-съемки земной поверхности включают, во-первых, определение параметров пространственного положения и движения КА, координат точки на поверхности Земли в фиксированные моменты времени с помощью соотношений предложенной аналитической модели; во-вторых, формирование значений погрешностей 11 варьируемых параметров, например, $\Delta X_S, \Delta Y_S, \Delta Z_S$... и т.д.; в-третьих, расчет основных статистических характеристик составляющих ошибок определения координат на основе 1000—1200 реализаций случайных совокупностей варьируемых параметров с помощью метода Монте-Карло. Статистические характеристики определяются путем статистического моделирования случайных величин и получения определенной выборки случайных значений, по которым затем вычисляются математические ожидания, дисперсии и гистограммы распределения составляющих ошибки по дальности и азимуту.

Имитационная модель реализуется в виде алгоритма и программы с помощью метода Монте-Карло. Алгоритм состоит из следующих основных шагов.

Шаг 1. Производится расчет случайной реализации исследуемой величины для точки на снимке с координатами x, y .

Шаг 2. По полученному массиву реализаций рассчитываются средние значения координат на местности, их среднеквадратические отклонения и строятся гистограммы распределения по дальности и азимуту РЛ-изображения.

Шаг 3. Рассчитываются максимальные и минимальные значения составляющих координат при выбранном варианте статистических испытаний.

Пример реализации гистограммы для координаты по азимуту приведен на рис. 3.

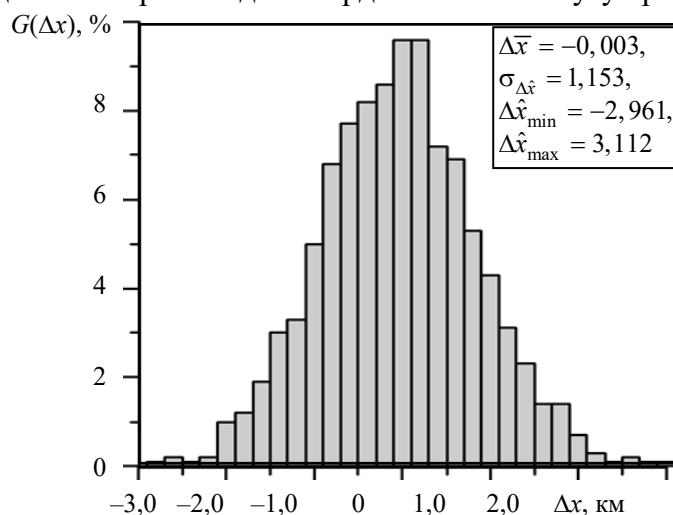


Рис. 3

Расчет параметров выполняется при прогнозе движения КА по маршруту для продолжения вариантов исследования.

Предлагаемая методика расчета статистических характеристик имеет универсальный характер, так как позволяет получить количественные характеристики случайных вариаций как для отдельных факторов, так и для различных комбинаций факторов.

Методика планирования съемки района наблюдения на основе расчета ее длительности. В результате проведенного исследования получен аналитический аппарат, описывающий влияние геометрических и информационных ограничений (разрешения, частоты отраженного сигнала, полосы захвата) на общее время наблюдения района с заданными координатами. Практический интерес представляет задача определения оптимальных значений углов наблюдения $\gamma_{\text{опт}}$, $\lambda_{\text{опт}}$, при которых обеспечивается максимальная ширина полосы обзора $H_{\text{обз max}}$ при заданных требованиях к качеству получаемых РЛ-изображений. Данная задача решается на основе разработанной методики, содержащей анализ влияния информационных показателей КРЛСН на выбор значений параметров съемки.

Расчет значений λ_0 для диапазона изменения углов визирования $[\gamma_{\min}, \gamma_{\max}]$ и соответствующего им диапазона наклонных дальностей $[R_{\min}, R_{\max}]$ позволяет определить наклонную дальность $R_{\text{опт}}$, для которой $(\lambda_{\max} - \lambda_{\min})/2$. Угол λ_0 вычисляется из решения квадратного уравнения (2) для требуемой частоты $f_d = f_{\text{тр}}$. После разворота ДН антенны на угол $\lambda_{\text{опт}}$ для данной точки на поверхности отраженный сигнал будет иметь требуемую доплеровскую частоту.

Методика состоит из следующих основных этапов.

1. Прогноз движения КА, расчет длительности наблюдения t_s , расчет начального $t_{\text{н}}$ и конечного $t_{\text{к}}$ времени съемки.

2. Расчет элементов матрицы поворота $[n_{i,j}]$, определяемой параметрами орбиты КА, и вычисление азимутального угла для диапазона углов визирования по формуле (2) на моменты времени $t_j \in [t_{\text{н}}, t_{\text{н}} + t_s]$.

4. Определение азимутального угла λ и углов ориентации антенны для наведения ее на центр полосы захвата.

5. Определение ширины доплеровского спектра B_d для рассматриваемой полосы обзора:

$$B_d \approx \Delta f_d = [f_d(\gamma_{\max}) - f_d(\gamma_{\min})] \Big|_{\lambda = \lambda_{\text{опт}}}.$$

6. Расчет информационных показателей и выбор параметров РСА:

- размера полосы обзора $H_{\text{обз}}$ на поверхности Земли;
- определение ближней границы полосы наблюдения;
- минимальной и максимальной наклонной дальности $R_{\min}, R_{\max}$;
- минимального и максимального углов обзора $\gamma_{\min}, \gamma_{\max}$;
- верхней и нижней частот повторения импульсов $f_{\max}, f_{\min}$.

При формировании длинных маршрутов наблюдения и для широкозахватного режима выполнение задачи съемки возможно путем разбиения всей длины маршрута объекта на элементарные участки (парциальные кадры) с дополнительным перенацеливанием ДН антенны перед сканированием каждого такого участка.

Количество снимаемых кадров в полосе обзора $N_{\text{обз}}$ определяется длительностью наблюдения t_s (см. формулу (1)):

$$N_{\text{обз}} = \text{int} \left\{ \frac{t_s}{t_p + t_{\text{ст}} + t_{\text{вкл}}} \right\},$$

где $(t_p + t_{\text{ст}})$ — время разворота КА для наведения антенны и время стабилизации КА, $t_{\text{вкл}}$ — время включения аппаратуры.

Время включения аппаратуры соответствует:

- времени пролета КА между первым и последним объектами в полосе захвата для режима маршрутной съемки;
- времени формирования каждой парциальной зоны [1] для режима обзорной съемки;
- времени накопления сигнала для формирования кадра на интервале синтезирования для режима максимального разрешения.

Длительность t_s также определяет:

- число съемок одного района через некоторые временные интервалы t_c под различными углами наблюдения (ракурсами)

$$M = \text{int} \left\{ \frac{t_s}{(t_p + t_{\text{ст}} + t_{\text{вкл}}) + t_c} \right\};$$

- коэффициент производительности за виток (K) и возможности орбиты по распределению времени наблюдения заданных объектов за период обращения (P) КА

$$K = t_s / P.$$

Заключение. Получены формулы для расчета длительности наблюдения района с целью оценки потенциальных возможностей РСА с учетом влияния геометрических условий съемки. Использование приведенных соотношений позволяет определить оптимальные параметры и режим съемки для достижения максимального обзора при сохранении информативных свойств получаемых изображений.

С учетом того, что для выполнения съемки необходимо учитывать возникающие искажения физического характера в пределах полосы обзора, определены зависимости, позволяющие оценить влияние углов ориентации ДН антенны на основные показатели КРЛСН. Полученные соотношения позволяют оценить возможности РСА при решении задач наблюдения или при проектировании КРЛСН, предъявить обоснованные требования к выбору основных характеристик РСА и баллистических параметров группировки КА.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Турук В. Э., Верба В. С., Голованова М. В., Голубцов П. Е., Евсиков М. В., Неронский Л. Б., Зайцев С. Э., Толстов Е. Ф. РСА „Стриж“ для малых космических аппаратов „Кондор-Э“ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14, № 5. С. 69—83.
2. Григорьев А. Н. Методика текущего планирования и применения космических средств при управлении системой дистанционного зондирования Земли // Вестн. Рос. нового ун-та. Сер. Сложные системы: модели, анализ и управление. 2015. № 1. С. 69—73.
3. Захаров А. И., Яковлев О. И., Смирнов В. М. Спутниковый мониторинг Земли: Радиолокационное зондирование поверхности. М.: URSS, 2015. 248 с.
4. Фомин А. Н., Тяпкин В. Н., Дмитриев Д. Д. и др. Теоретические и физические основы радиолокации и специального мониторинга: Учебник / Под общ. ред. И. Н. Нищука. Красноярск: СФУ, 2016. 292 с.
5. Elachi C., Bicknell T., Chialin Wu. Spaceborne Synthetic-Aperture Imaging Radars: Applications, Techniques, and Technology // IEEE. Proc. 1982. Vol. 70, N 10.
6. Wong F., Cumming I. G. A combined SAR Doppler centroid estimation scheme based upon signal phase // IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing. 1996. Vol. 34. P. 696—707.
7. Madsen S. N. Estimating the Doppler centroid of SAR data // IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems. 1989. Vol. 25. P. 134—140.
8. Moreira A., Prats-Iraola P., Younis M., Krieger G., Hajnsek I., Papathanassiou K. A Tutorial on Synthetic Aperture Radar // IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine. 2013. N 1 (1). P. 6—43.
9. Tomiyasu K. Tutorial Review of Synthetic-Aperture Radar (SAR) with Applications to Imaging of the Ocean Surface // IEEE Proc. 1978. Vol. 66, N 5.
10. Tomiyasu K. Conceptual Performance of a Satellite Borne, Wide Swath Synthetic Aperture Radar // IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing. 1981. Vol. 19, N 2. P. 108—11.
11. Curlander J. C. Location of Spaceborne SAR Imagery // IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing. 1982. Vol. Ge-20, N 3.
12. Чевычелов Е. А., Ломов В. А. Определение длительности видеоконтакта ИСЗ с районом наблюдения // Исследование Земли из космоса. 1991. № 3. С. 67—72.
13. Верба В. С., Неронский Л. Б., Осипов И. Г., Турук В. Э. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / Под ред. В. С. Вербы. М.: Радиотехника, 2010. 680 с.
14. Li F., Held D., Curlander J., Wu C. Doppler Parameter Estimation for Spaceborne Synthetic Aperture Radars // IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing. 1985. GE-23, N 1. P. 47—55.
15. Curlander J. Synthetic Aperture Radar, Systems and Signal Processing. N. Y.: John Wiley & Sons Inc., 1991.
16. Основы теории полета космических аппаратов / Под ред. Г. С. Нариманова, М. К. Тихонравова. М.: Машиностроение, 1972. 607 с.
17. Анатольев А. Ю., Зайцев В. В. Методика исследования поля скоростей движения оптического изображения космических оптико-электронных средствах // Сб. алгоритмов и программ. СПб: ВИКА, 1998.

Сведения об авторе

Владимир Валентинович Зайцев — канд. техн. наук; ВКА им. А. Ф. Можайского, кафедра оптико-электронных средств; преподаватель E-mail: vka@mil.ru

Поступила в редакцию 12.05.2022; одобрена после рецензирования 23.06.2022; принята к публикации 30.07.2022.

REFERENCES

1. Turuk V.E., Verba V.S., Golovanova M.V., Golubtsov P.E., Evsikov M.V., Neronsky L.B., Zaitsev S.E., Tolstov E.F. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* (Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space), 2017, no. 5(14), pp. 69–83 (in Russ.)
2. Grigoriev A.N. *Bulletin of the Russian New University. Series: Complex systems: models, analysis and control*, 2015, no. 1, pp. 69–73. (in Russ.)
3. Zakharov A.I., Yakovlev O.I., Smirnov V.M. *Sputnikovyy monitoring Zemli: Radiolokatsionnoye zondirovaniye poverkhnosti* (Satellite Earth Monitoring: Radar Surface Sounding), Moscow, 2015, 248 p. (in Russ.)

4. Fomin A.N., Tyapkin V.N., Dmitriev D.D. et al. *Teoreticheskiye i fizicheskiye osnovy radiolokatsii i spetsial'nogo monitoringa* (Theoretical and Physical Foundations of Radar and Special Monitoring), Krasnoyarsk, 2016, 292 p. (in Russ.)
5. Elachi C., Bicknell T., Chialin Wu. *Proceedings of the IEEE*, 1982, no. 10(70), October.
6. Wong F. and Cumming I.G. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1996, vol. 34, pp. 696–707.
7. Madsen S.N. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1989, vol. 25, pp. 134–140.
8. Moreira A., Prats-Iraola P., Younis M., Krieger G., Hajnsek I., Papathanassiou K. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 2013, no. 1(1), pp. 6–43.
9. Tomiyasu K. *IEEE Proc.*, 1978, no. 5(66), May.
10. Tomiyasu K. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1981, no. 2(19), pp. 108–117.
11. Curlander J.C. *Location of Spaceborne SAR Imagery. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1982, no. 3(Ge-20), July.
12. Chevychelov E.A., Lomov V.A. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 1991, no. 3, pp. 67–72. (in Russ.)
13. Verba V.S., Neronsky L.B., Osipov I.G., Turuk V.E. *Radiolokatsionnyye sistemy zemleobzora kosmicheskogo bazirovaniya* (Space-Based Ground-Survey Radar Systems), Moscow, 2010, 680 p. (in Russ.)
14. Li F., Held D., Curlander J., Wu C. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE-23, 1985, no. 1, pp. 47–55.
15. Curlander J. and McDonough R.N. *Synthetic Aperture Radar, Systems and Signal Processing*, John Wiley & Sons, Inc., NY, 1991.
16. Narimanov G.S., Tikhonravov M.K., ed., *Osnovy teorii poleta kosmicheskikh apparatov* (Fundamentals of the Theory of Spacecraft Flight), Moscow, 1972, 607 p. (in Russ.)
17. Anatolyev A.Yu., Zaitsev V.V. *Metodika issledovaniya polya skorostey dvizheniya opticheskogo izobrazheniya kosmicheskikh optiko-elektronnykh sredstvakh, Sbornik algoritmov i programm* (Technique for Studying the Field of Velocities of Motion of an Optical Image in Space Optical-Electronic Means, Collection of Algorithms and Programs), St. Petersburg, 1998. (in Russ.)

Data on author

Vladimir V. Zaytsev — PhD; A. F. Mozhaisky Military Space Academy, Department of Optical and Electronic Means, Lecturer; E-mail: vka@mil.ru

Received 12.05.2022; approved after reviewing 23.06.2022; accepted for publication 30.07.2022.