

ISSN 2078-9181

DOI 10.15622/sp.56

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
Отделение нанотехнологий и информационных технологий

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ИНСТИТУТ ИНФОРМАТИКИ И АВТОМАТИЗАЦИИ РАН

ТРУДЫ СПИИРАН

proceedings.spiiras.nw.ru



ВЫПУСК 1(56)



Санкт-Петербург
2018

18+

SPIIRAS PROCEEDINGS

Issue № 1(56), 2018

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

Trudy SPIIRAN ♦ Founded in 2002 ♦ Труды СПИИРАН

Founder and Publisher

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

Editor-in-Chief

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

Editorial Board Members

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

Editor: E. P. Miroshnikova

Technical editor: A. I. Motienko

Translator: P. N. Emeleva

Editorial Board's address

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

The journal is indexed in Scopus

© St. Petersburg Institute for Informatics and Automation
of the Russian Academy of Sciences, 2018

ТРУДЫ СПИИРАН

Выпуск № 1(56), 2018

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

Учредитель и издатель

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

Главный редактор

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

Редакционная коллегия

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

Редактор: Е. П. Мирошникова

Технический редактор: А. И. Мотиечко

Переводчик: П. Н. Емелева

Адрес редакции

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

Журнал индексируется в международной базе данных Scopus

Журнал входит в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени доктора и кандидата наук»

© Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук, 2018
Разрешается воспроизведение в прессе, а также сообщение в эфир или по кабелю опубликованных в составе печатного периодического издания-журнала «Труды СПИИРАН» статей по текущим экономическим, политическим, социальным и религиозным вопросам с обязательным указанием имени автора статьи и печатного периодического издания-журнала «Труды СПИИРАН»

CONTENTS

Artificial Intelligence, Knowledge and Data Engineering

K. Sandkuhl, A.V. Smirnov KNOWLEDGE MANAGEMENT IN PRODUCTION NETWORKS: CLASSIFICATION OF KNOWLEDGE REUSE TECHNIQUES	5
S.N. Kirillov, V.T. Dmitriev A COMPLEX ALGORITHM FOR OBJECTIVE EVALUATION OF THE DECODED SPEECH SIGNAL QUALITY UNDER THE ACTION OF ACOUSTIC INTERFERENCE	34
H. Samani MULTIMODAL COGNITIVE PROCESSING USING ARTIFICIAL ENDOCRINE SYSTEM FOR DEVELOPMENT OF AFFECTIVE VIRTUAL AGENTS	56

Digital Information Telecommunication Technologies

O.V. Kofnov, E.L. Lebedev, A.V. Mikhailenko COMPUTER SIMULATION OF THE DIFFRACTION OF MILLIMETER ELECTROMAGNETIC WAVES TO DETECT INTERNAL DEFECTS OF PRODUCTS MADE USING ADDITIVE TECHNOLOGY	76
G.N. Maltsev, A.V. Nazarov, V.L. Yakimov THE STUDY OF THE DIAGNOSING OF AUTOMATIC SPACECRAFT ON-BOARD EQUIPMENT USING A DISCRETE-EVENT SIMULATION MODEL	95
V.I. Merkulov, P.A. Sadovskiy ESTIMATION OF DISTANCE AND ITS DERIVATIVES IN THE BISTATIC PASSIVE RADAR LOCATION SYSTEM	122
L.F. Nozhenkova, O.S. Isaeva, A.A. Evsyukov TOOLS OF COMPUTER MODELING OF THE SPACE SYSTEMS' ONBOARD EQUIPMENT FUNCTIONING	144

Mathematical Modeling, Numerical Methods

A.I. Loskutov, G.I. Kozyrev, V.A. Klykov, O.L. Shestopalova SYNTHESIS OF ADAPTIVE MATHEMATICAL MODELS OF ONBOARD ELECTRONIC SYSTEMS OF THE SPACECRAFT THROUGH THE APPLICATION OF MATHEMATICAL HOMOLOGOUS STRUCTURES	169
M.S. Lytaev A NUMERICAL METHOD FOR ESTIMATING TROPOSPHERIC RADIO WAVE PROPAGATION FOR REMOTE MONITORING GEOINFORMATION SYSTEMS	195
O.I. Smokty MODELING OF RADIATION FIELDS OF UNIFORM ANISOTROPICALLY SCATTERING SLAB OF ARBITRARY OPTICAL THICKNESS	214

СОДЕРЖАНИЕ

Искусственный интеллект, инженерия данных и знаний

- К. Зандкуль, А.В. Смирнов
УПРАВЛЕНИЕ ЗНАНИЯМИ В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СЕТЯХ: КЛАССИФИКАЦИЯ И
ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ПОВТОРНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЗНАНИЙ 5
- С.Н. Кириллов, В.Т. Дмитриев
КОМПЛЕКСНЫЙ АЛГОРИТМ ОБЪЕКТИВНОЙ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА
ДЕКОДИРОВАННОГО РЕЧЕВОГО СИГНАЛА ПРИ ДЕЙСТВИИ АКУСТИЧЕСКИХ
ПОМЕХ 34
- Х. Самани
МНОГОМОДАЛЬНАЯ КОГНИТИВНАЯ ОБРАБОТКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ИСКУССТВЕННОЙ ЭНДОКРИННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ РАЗВИТИЯ АФФЕКТИВНЫХ
ВИРТУАЛЬНЫХ АГЕНТОВ 56

Цифровые информационно-телекоммуникационные технологии

- О.В. Кофнов, Е.Л. Лебедев, А.В. Михайленко
КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИФРАКЦИИ МИЛЛИМЕТРОВЫХ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ВНУТРЕННИХ ДЕФЕКТОВ
ИЗДЕЛИЙ, ВЫПОЛНЕННЫХ ПО АДДИТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ 76
- Г.Н. Мальцев, А.В. Назаров, В.Л. Якимов
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ
АВТОМАТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ДИСКРЕТНО-СОБЫТИЙНОЙ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ 95
- В.И. Меркулов, П.А. Садовский
ОЦЕНИВАНИЕ ДАЛЬНОСТИ И ЕЕ ПРОИЗВОДНЫХ В ДВУХПОЗИЦИОННОЙ
ПАССИВНОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ 122
- Л.Ф. Ноженкова, О.С. Исаева, А.А. Евсюков
ИНСТРУМЕНТЫ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ
БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ 144

Математическое моделирование и прикладная математика

- А.И. Лоскутов, Г.И. Козырев, В.А. Клыков, О.Л. Шестопалова
СИНТЕЗ АДАПТИВНЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ БОРТОВЫХ
РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НА ОСНОВЕ
ПРИМЕНЕНИЯ ГОМОЛОГИЧНЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ СТРУКТУР 169
- М.С. Лытаев
ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ТРОПОСФЕРНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН В ЗАДАЧАХ ПОСТРОЕНИЯ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ
СИСТЕМ ДИСТАНЦИОННОГО МОНИТОРИНГА 195
- О.И. Смоктий
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛЕЙ ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛОСКОГО АНИЗОТРОПНО
РАССЕИВАЮЩЕГО ОДНОРОДНОГО СЛОЯ ПРОИЗВОЛЬНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ
ТОЛЩИНЫ 214

**KNOWLEDGE MANAGEMENT IN PRODUCTION NETWORKS:
CLASSIFICATION OF KNOWLEDGE REUSE TECHNIQUES**

Sandkuhl K., Smirnov A.V. Knowledge Management in Production Networks: Classification of Knowledge Reuse Techniques.

Abstract. Many studies in the field of knowledge management indicate that enterprises and organizations establishing systematic sharing, transfer and reuse of knowledge can expect substantial benefits. Although sharing and transfer of knowledge requires a way to transfer or capture knowledge, not much work has been spent in investigating what kinds of reuse techniques are used in organizations. Starting from a classification of approaches to knowledge reuse, this paper investigates the state of knowledge reuse in production networks with a specific focus on networks of small and medium-sized enterprises (SME). The aim of the paper is twofold: for production networks, the intention is to investigate which kind of reusable knowledge, in terms of the classification developed, is most relevant for such networks; for the approach to the classification of knowledge reuse techniques, the aim is to further refine the approach and validate it in the field of production network research. The main contributions of this paper are (1) an analysis of reuse situations in SME networks, (2) evaluation of the proposed approach to the knowledge reuse classification for use in the reuse situations and (3) further refinement and validation of the classification approach.

Keywords: knowledge transfer, knowledge representation, production networks, SME networks.

1. Introduction. In the field of knowledge management, various studies have been carried out in order to determine preconditions, structures, procedures and best practices for successfully implementing systematic management of knowledge in organizations (see, e.g. [1-3]). The results of these studies indicate that enterprises and organizations establishing knowledge management structures can expect advantages and benefits, like reducing problem-solving time, faster delivery to market, cost reduction for specific activities [4], more effectivity in design for manufacturing [5], or better internal communication and increased staff participation [6]. The belief is that systematic development and reuse of knowledge will contribute to improving competitiveness of an enterprise [7]. Methods, tools and technologies used in this field stem from different areas of computer science and business information systems, among them knowledge engineering [8] and enterprise knowledge modelling [9] which offer means for capturing knowledge in defined representations in order to support the entire lifecycle of organizational knowledge management. Work presented in this paper focuses on a specific aspect of knowledge management and knowledge engineering: knowledge prepared for reuse.

The work brings together experiences in knowledge management for production networks and previous work on knowledge reuse and classification of reuse approaches [10]. Production networks in general are a cross-

enterprise organization structure implementing and managing distributed value creation and product/service delivery in a coordinated and often geographically distributed partner structure. Knowledge management for such networked structures has been investigated before which showed that specifics and needs for SME networks have not been extensively investigated (see Section “Background”). In this paper, the focus will be on such SME networks.

Experiences from industrial projects show that selecting the appropriate approach from the multitude of knowledge reuse techniques is difficult for practitioners (see, e.g. [11]). In our previous work we developed a classification of knowledge reuse approaches with clearly defined criteria motivated from industrial practice in order to assist selection of a suitable approach for a given knowledge reuse situation [10]. The aim of the paper is twofold: for production networks, the intention is to investigate which kind of reusable knowledge, in terms of our classification approach, is most relevant for such networks; for the classification approach of knowledge reuse techniques, the aim is to further refine it and validate it in the field of production network research. The main contributions of this paper are (1) an analysis of reuse situations in production networks with specific focus on SME, (2) evaluation of the developed knowledge reuse classification for use in the reuse situations and (3) further refinement and validation of the classification approach.

From a research method perspective, our work includes several stages for investigating the above research issue. The first stage is a literature review of knowledge management in production networks with the intention, to identify examples for knowledge reuse cases. The second stage is to apply the classification approach for knowledge reuse on the results of the literature study in order to evaluate its applicability and identify improvement potential. The third stage is to use the results of the classification in order to derive conclusions regarding the techniques for knowledge reused applied in SME production networks.

The remaining part of this paper is structured as follows: The next Section will give background information on production networks and knowledge reuse including different interpretations of the term as such. The third Section summarizes the classification approach for knowledge reuse developed in earlier work. It follows a Section that presents the results of the literature study on knowledge reuse in production networks and an example for knowledge reuse in an actual SME network. The literature study results and the example are analyzed from a classification perspective. In the fifth Section the classification approach is validated. The sixth Section contains a discussion about the kinds of knowledge reuse techniques considered most relevant for production networks. The final Section summarizes the findings and discusses future work.

2. Background. From a technological perspective, the background for this paper is work on knowledge reuse. From an application perspective, research in production network forms the basis. Both background areas are briefly summarized in this Section.

2.1. Production networks and SME networks. Globalization and increased competition on worldwide markets require new forms of organization and work support. Growing requirements to flexibility, lead time reduction or customization possibilities have caused a need to establish numerous collaborative partnerships between enterprises. Networked organizations, virtual enterprises, production and supply networks emerged [12]. Examples for such kinds of networks can be found in automotive industry. Typical car manufacturers that made 75% of product components 25 years ago now make only 25% of those components and 50-70% of product cost is with suppliers. Organizations of this form use information and communication technologies to extend their boundaries and physical location and form multiple links across the boundaries to work together for a common purpose. There is a rich body of knowledge about advantages, strategic drivers, organizational practices and other aspects for such networks (see, e.g. [13-15]). However, knowledge reuse and knowledge management practices in production networks have not been investigated in detail (cf. Section “Knowledge Reuse in Production Networks”).

Especially in small and medium sized enterprises (SME), the competitiveness and future market position of an enterprise is closely related to the ability of cooperating with partners in SME networks or supplier organizations. SME networks are communities or associations of enterprises based on common economical and value-creation objectives. They pro-actively form co-operations for joint development or project work. These co-operations typically are temporary, dynamical with respect to the members, geographically distributed, flexible and quick responsive to market demands.

SMEs usually have a number of internal knowledge sources which should be used more systematically and intensively in cooperation projects. Although most knowledge exists in the heads of employees, there usually is a substantial amount of externalized knowledge, i.e. stored electronically in documents, databases or information systems. Furthermore, corporate knowledge represented in work processes, organization structures or best practices also is an important knowledge asset. All these knowledge sources of specific importance in complex work processes with a number of distributed partners, high competence requirements and a lot of rules and guidelines to be obeyed. In these situations it is important to discover the exactly “right” knowledge source, to find it “in time” and to get access to it fast. During the last decade, a number of knowledge reuse, knowledge sharing and knowledge supply cases in industrial application scenarios were report-

ed (see, e.g., [16, 17] and [50]). The majority of these cases stems from large companies, or from IT-intensive middle-sized or small enterprises. Existing studies about IT use in SMEs, like [18], do not cover knowledge reuse techniques sufficiently. Drawing conclusions from experiences of larger enterprises with regards to SMEs is not appropriate, as SMEs have their own characteristics [19]: SMEs often belong to the "late adopters" of new technology, i.e. they prefer mature technologies, which are easy to deploy, use and maintain. SMEs show a clear preference for to a large extent standardized processes and solutions. Innovation projects in SMEs typically have to contribute to business value within a short time frame.

2.2. Knowledge Reuse in Knowledge Management and Knowledge Engineering. Research in knowledge reuse is performed in various disciplines including economic sciences, psychology, engineering sciences or education sciences. In the scope of this paper with its focus on IT-related approaches and techniques, we will focus on computer science and business information systems. It is important to understand related areas in order to position knowledge reuse with respect to related work. Many approaches for knowledge reuse either originate from research on knowledge management or from knowledge engineering. Both areas aim at supporting the "lifecycle" of knowledge from inception to use and both include technological and methodical approaches.

The most relevant areas related to knowledge reuse are

- Knowledge management systems from an organizational perspective. These systems describe how to establish systematic knowledge management in an organization in terms of activities and organizational structures required. Well-known approaches in this area are the "building block" model proposed by Probst et. al. [20] and the SECI model [21],

- Knowledge management systems from a technology perspective, i.e., IT-systems supporting organizational knowledge management, organizational memory [51] and decision support [48]. In this area, Maier et al.'s architecture proposal [22] for such systems and the differentiation between various knowledge services as components of this architecture is often applied.

- Knowledge representation techniques defined how explicit knowledge should be stored, e.g. as a knowledge base for different applications. [23] provides an overview to such techniques from computer science.

- Knowledge fusion addresses the question how to create new explicit knowledge from various knowledge sources [49], which often have different abstraction levels. [24] includes an overview to existing techniques in this field.

- Organizational situations for knowledge reuse were identified by Markus [25]. Knowledge about these situations supports the design of knowledge representation techniques and organizational practices.

– Evaluation of knowledge and knowledge management systems aims at deciding whether knowledge is useful for an organization and what the value is. Two selected approaches in this field are Delone and McLeans’s IS success model [26] and Jennex and Olfman’s approach [27].

Our past research work included activities which contributed to both, the organizational aspects of knowledge management and knowledge representation, and the technical aspects of these fields. Regarding the organizational aspects, this included capturing organizational knowledge in enterprise models [28], enterprise knowledge models or organizational knowledge patterns [29]. The more technology-oriented work was in the field of ontology patterns [30] and ontology engineering practices [31].

During our previous work on knowledge reuse techniques, we performed an analysis of related work for the organizational aspects of knowledge reuse and for the more technology-oriented aspects of this field. During this related work analysis, which is published in [31-34], many different techniques were discovered which either explicitly stated that they were designed for knowledge reuse or which due to their application context have to be considered as part of this field.

3. Criteria for Comparing Knowledge Reuse Approaches. The different perspectives and the variety of approaches for knowledge reuse discussed in the previous Section were an important motivation for the development of a classification approach for knowledge reuse techniques, which was first published in [10]. This approach is based on the analysis of literature in the field of knowledge management and knowledge engineering (see previous Section), on own work in developing knowledge reuse techniques and methods and experiences in industrial application of knowledge reuse. This Section summarizes the proposed such a classification which consists of a number of criteria for comparing knowledge reuse approaches. The main purpose of these criteria is to support interested researchers and practitioners in navigating through the wealth of reuse approaches being published in the scientific literature.

The proposed criteria are discussed in the following parts of this Section:

- Reuse techniques
- Reuse situations
- Capacity of knowledge representation
- Addressee of knowledge
- Scope of the knowledge
- Phase of solution development
- Validation status

The selection of the above criteria was guided by the intention to represent different and complementary aspects of knowledge reuse from an organizational and a technological perspective. The criteria reuse situation,

addressee of knowledge, validation status and phase of solution development are directed towards organizational aspects, whereas reuse technique, capacity of knowledge representation and scope address technological aspects. This set of criteria probably is not exhaustive, i.e., definition of additional criteria is possible and application of the criteria set is expected to show what additional ones are recommendable (see also Section 5).

All criteria aim at sorting knowledge reuse approaches into categories with respect to the criteria under consideration, i.e., all criteria contain a list of categories to be used. In case none of the given categories is applicable when using one of the criteria for a certain reuse approach, the additional category “other” should be used. Such a case would call for a discussion about an extension of the above classification scheme.

3.1. Reuse Techniques. In general, a technique denotes “practical method or art applied to some particular task”. In the context of knowledge reuse, we propose to consider techniques from computer science developed as means to facilitate reuse. Based on the literature search mentioned in the previous Section, we identified four techniques frequently used in knowledge reuse which are summarized in Table 1.

Table 1. Reuse techniques distinguished in the classification approach

Reuse Technique	Description
Module based techniques	a module is a self-contained component of a solution with defined interfaces hiding the actual implementation. The module has to be used „as is“, i.e., without changing it, and often will be composed together other modules to a solution
Reference Architecture based techniques	architectures in general identify the main building blocks of a system with their interfaces and dependencies. Reference architectures are architectures reflecting the common building blocks for a defined domain which were agreed on by the stakeholders in that domain. Reference architecture can be considered as technique for knowledge reuse „in the large“.
Template based techniques	a template is a gauge to be used as a guide in making something accurately for a defined purpose. A template defines the structure but not the content; usually no behavioral aspects included
Pattern based techniques	a pattern provides solution principles (and how to implement them) for a recurring problem in a specific context by abstracting from actual application. A pattern exposes the core elements of the solution (structure and behavior) and consequences of using it. A pattern cannot be used as it is (unlike a module) but always has to be adapted for the purpose at hand

The question to be answered for this criterion when classifying a knowledge reuse approach is: “What knowledge reuse technique is used by the knowledge reuse approach?”

3.2. Reuse Situations. The concept of reuse situations was proposed by Markus [25] as a way to characterize typical situations in organization where a demand of knowledge reuse arises. The reuse situations identified by Markus are shown in Table 2.

Table 2. Reuse situations in the classification approach

Reuse Situation	Description
Shared work procedures	this situation exists when people work together on a team, either with the same roles or tasks or with different functions (cross-functional) and reuse work procedures earlier developed by themselves, i.e., they are producers of knowledge for their own later reuse
Shared work practitioners	when people in different organizational or geographical settings do similar work and share knowledge between each other in order to support their work. These people are not part of a team, but they have similar tasks. They are producers of knowledge for each other's reuse
Expertise-seeking novices	people with an occasional need for expert knowledge that they do not possess and do not need to acquire themselves because they need it rarely can be called expertise-seeking novices. Thus, this situation is given when a task has to be performed just once and the knowledge is required for this task only
Secondary knowledge miners	people who seek to answer new questions or develop new knowledge can be considered as “mining” for new knowledge. Through analysis of records or documentation produced by other people for different purposes, they aim to reuse knowledge

The question to be answered for this criterion when classifying a knowledge reuse approach is: “For what knowledge reuse situation has the knowledge reuse approach been designed?”

3.3. Capacity of the Knowledge Representation. This criterion is based on Alan Newell’s work on knowledge levels. For Newell, knowledge is that which an observer ascribes to an intelligent agent (human or machine) that allows the observer to construe the agent’s behavior as rational, i.e. behavior that allows the agent to achieve its perceived goals [35, 36]. Newell emphasizes that knowledge is an abstraction that cannot be written down. Data structures that we might use to encode knowledge in a computer knowledge base are not equivalent to the knowledge (the capacity for behavior) that those data structures represent. We are able to use data structures (symbols) to represent knowledge in a knowledge base, but those symbols cannot generate intelligent behavior – unless some process is applied to those symbols. This means we have to distinguish the symbols in a knowledge base (knowledge representation) from the knowledge (capacity for rational behavior) that the symbols can be used to generate.

Sharing and reuse of knowledge according to Newell requires specific preconditions. Knowledge bases have meaning only when they are processed by some interpreter - either by a computer program or by our own minds. We cannot share and reuse knowledge bases if we do not also share and reuse the inference engines (or mental processes) that bring our knowledge bases to life. Although we may speak of transferring “knowledge” from one site to another, we can at best transfer knowledge bases. We design our knowledge bases so that they can be processed to produce intelligent behavior. According to Newell, the area of problem solving is one of the application fields for sharing and reuse of knowledge. Sharing knowledge about problem solving requires a format for knowledge representation; a shared vocabulary; a conceptual model; and a process to be performed by the interpreter using the knowledge base.

Capacity reflects how much of a problem solving task can be represented by the knowledge reuse approach under consideration, i.e., how “powerful” is the reuse approach when it comes to capturing all parts of the relevant knowledge. Regarding the capacity of the knowledge representation the levels summarized in Table 3 are distinguished.

Table 3. Capacity of reuse distinguished in the classification approach

Capacity	Description
knowledge representation format	a knowledge representation format only defines how to represent the knowledge when explicating it. Often this includes syntax and semantics of records in knowledge bases, information structures in databases or languages to represent knowledge
reusable lexicon / shared vocabulary	in addition to the knowledge representation format, capturing knowledge usually requires the definition of what terms and concepts may be used for representing knowledge and what their meaning is
shared conceptual model	the relations between different concepts of the shared vocabulary has to be captured in order to represent knowledge. A knowledge reuse approach with the capacity to express a shared conceptual model usually allows for the definition of hierarchies, taxonomic relationships, classes of objects, characteristics of classes, etc.
process reuse	according to Newell, the knowledge representation alone is not sufficient to capture knowledge but there has to be an interpreter (which can be a machine or the mental process of the human) using what is represented. If the knowledge reuse approach allows for representing the process to be performed by interpreter independent of knowledge representation format but dependent on the interpreter, it has the capacity of process reuse
problem solving reuse	the highest capacity level is reached, if the process to be performed by an interpreter can be represented independent of the knowledge representation format and independent of the interpreter

It should be noted that the above levels of knowledge representation are building on top of each other, i.e., “reusable lexicon / shared vocabulary” requires “knowledge representation format”; “shared conceptual model” requires “reusable lexicon / shared vocabulary” and “knowledge representation format”; etc.

The question to be answered for this criterion when classifying a knowledge reuse approach is: “What capacity does the knowledge representation underlying the reuse approach provide?”

3.4. Addressee of knowledge. The addressee of knowledge captured by a reuse approach can be considered as the target group which is supposed to use the knowledge.

Most reuse approaches capture knowledge which is meant to be used by an individual in her/his work context, but there are also knowledge reuse approaches suitable for organizational knowledge only. With this criterion, we aim to distinguish whether the knowledge reuse approach under consideration is meant for. The potential addressees are summarized in Table 4. The question to be answered for this criterion when classifying a knowledge reuse approach is: “What is the main target group of the knowledge provided by the reuse approach?”

Table 4. Addressees of knowledge distinguished in the classification approach

Addressee	Description
Individual	the knowledge is meant for an individual when performing tasks as part of his/her organizational role
Group of people	the knowledge is not meant or not to be used or not possible to use by an individual on its own, but it usually does not happen within an organizational context
Organization	the knowledge can only be reused in an organization with an organizational context in place
Several organizations	the knowledge concerns several organizations cooperating with each other (inter-organization)

3.5. Scope of the knowledge. In the context of knowledge management, approaches for reusing knowledge often focus on specific perspectives of enterprise knowledge, like knowledge about processes or about products. The criteria “scope of knowledge” addresses this fact and aims at classifying knowledge reuse according to these perspectives. We propose to base this criterion on work from enterprise knowledge modelling. In general terms, enterprise modelling is addressing the systematic analysis and modelling of processes, organization structures, products structures, IT-systems or any other perspective relevant for the modelling purpose [37]. Enterprise knowledge modelling combines and extends approaches and techniques from enterprise modelling. The knowledge need-

ed for performing a certain task in an enterprise or for acting in a certain role has to include the context of the individual, which requires including all relevant perspectives in the same model. Thus, an essential characteristic of knowledge models are “mutually reflective views of the different perspectives included in the model” [9]. As a best practice for capturing such mutually reflective views, the POPS* perspectives were proposed: the enterprise’s processes (P), the organization structure (O), the product developed (P), the IT system used (S) and other aspects deemed relevant when modelling (*) [38].

Based on this best practice, the criterion is supposed to capture, what the main scope of the knowledge in the knowledge reuse approach is. The different options are shown in Table 5.

The questioned to be answered for this criterion when classifying a knowledge reuse approach is: “What is the scope of the knowledge captured by the knowledge reuse approach?”

Table 5. Scope of knowledge distinguished in the classification approach

Scope	Description
Product	the knowledge concerns about a product. It should be noted that a product of an enterprise does not have to be a physical product but can be a service provided to a customer, i.e., it can be a “service product”
IT solution or artefact	the knowledge is related to an IT solution or artefact within the solution development process
Process	the knowledge is explicitly addressing a process or a way to perform certain activities in an organization e
Organization structure	the knowledge is about organization structures, e.g. how to implement certain roles, positions or structural characteristics

3.6. Phase of solution development. Both in knowledge management and in knowledge engineering, the introduction or development of systems or solutions to given problems happen in a systematic way, which is reflected in development phases. Many knowledge reuse approaches were designed for a specific development phase. The purpose of the criterion is to determine in which solution development phase the knowledge reuse approach under consideration is supposed to be useful or applicable. We distinguish between 7 traditional phases, which for example are reflected in software engineering approaches, like Boehm’s spiral model [39]. These phases are explained in Table 6.

The questioned to be answered for this criterion when classifying a knowledge reuse approach is: “For what phase of the solution development process situation has the knowledge reuse approach been designed?”

Table 6. Phases of solution development distinguished in the classification approach

Phase of solution development	Description
Analysis	Knowledge relevant for solution development when analyzing requirements or application contexts for the envisioned solution
Specification	Knowledge which is reusable when specifying the expected structure and behavior of the envisioned solution
Design	Knowledge which is reusable when designing the solution in the large (architecture) or in detail (component design)
Implementation	Reusable knowledge for implementing the solution
Verification and Validation	Knowledge relevant for validating and verifying the solution including test designs and data
Operation	Knowledge relevant during operations and execution
Maintenance	Knowledge for detecting or avoiding problems during operations

3.7. Validation Status of the Approach. The validation status of the reuse approach is considered an important criterion in order to, e.g., judge the suitability of the approach for use in industrial practice. Our assumption is that the more an approach has been validated in theory and practice, the more mature and useful it is. Among the many scientific approaches for validating research results, we base our proposal for judging the validation status on the work of Lincoln and Guba ([40], p. 289 ff.) on “naturalistic inquiry”. On the one hand, we distinguish between theoretical and practical validation. Theoretical validation means assessing an approach within the theories of the domain the approach is part of or supposed to contribute to. In the context of knowledge reuse, this means to assess the soundness, feasibility, consistency within the body of knowledge in, for instance, knowledge management and knowledge engineering. Practical validation encompasses all kinds of application of the approach for validation purposes, which requires defined procedures and documenting results.

This could be simple lab examples illustrating the approach, controlled experiments in a lab setting, application in industrial cases, etc.

On the other hand, we consider the context of validation and distinguish between validation by the developers of the approach in their internal environment, validation by the developers outside the internal environment, and validation by other actors than the developers. Combining these two perspectives leads to a two by three matrix, which is depicted in Table 7. The cells of this Table show typical ways of validation for the different combinations of the two perspectives.

Table 7. Validation steps according to Lincoln and Guba

Validation steps	Theory	Practice
Internal, development team	Validation against state of research, internal consistency checks	Prototype implementation for checking feasibility, test in lab environment
External, in validation context	Peer-review of publications describing approach and concepts, comparison to known best practices of the domain	Case studies with application partners using the artifacts for evaluation purposes Application of the developed artifacts in cooperation / under instruction from developers
External, in application context	Development of extensions or enhancements of the concepts and approaches by external actors Application of the artifacts for creation of new theoretical knowledge Comparison with related approaches	Use of the artifacts developed (e.g. algorithms, methods, software components) for solutions

Using the above matrix, information about the knowledge reuse approaches has to be used to determine where to position the validation status for the reuse approach in the matrix. Usually, validation starts on the “internal, development team” level with validation in theory followed by validation in practice, and proceeds “downward” in the matrix with alternating theory and practice validation to “external, in application context”. Thus, the highest validation status would be reached if all cells in the matrix were covered.

The questioned to be answered for this criterion when classifying a knowledge reuse approach is: “What validation status does the knowledge reuse approach have?”

4. Knowledge Reuse in SME Production Networks. This Section focuses on an analysis of knowledge reuse situations in production networks in general and networks of small and medium-sized enterprises (SME) in particular. This analysis consists of two parts: in the first part, a literature analysis regarding knowledge reuse is described. In the second part, an example for an industrial network is presented and analyzed.

4.1. Literature Analysis. The literature analysis performed for this paper followed a systematic process described by Kitchenham [41]. Starting point was the definition of research questions guiding the systematic literature analysis. In our case the main questions were:

– RQ1: What scientific work has been done on knowledge reuse in production networks?

– RQ2: Using the classification approach presented in the third Section, what knowledge reuse techniques have been described in the published work?

In the next step, the literature sources to be analyzed had to be defined. Since knowledge reuse and knowledge management are interdisciplinary subjects, literature sources from computer science and information systems were included. We analyzed SpringerLink, IEEE xplore, AISeL and ScienceDirect. In the search term we included knowledge management and not only knowledge reuse to make sure that papers were selected which did not explicitly mention the term reuse. Furthermore, in addition to production network, we also included terms commonly used as a synonym or generalization. The final search term used in all literature databases was as follows:

(“Knowledge Management” OR “Knowledge Reuse”) AND (“Production Network” OR “Manufacturing Network” OR “SME-network” OR “SME-cluster” OR “SME network” OR “SME cluster” OR “Networked Organization” OR “Networked Organization”)

The search was performed in title, abstract and keywords or metadata. The list of hits in each literature database was analyzed paper by paper. In this step, only those papers were selected which described a knowledge reuse technique or examples, organization structures or practices for reuse. Table 8 shows the number of papers retrieved.

Table 8. Number of papers retrieved in the literature analysis

Literature Source	No. of hits for the search term	No. of relevant papers
IEEE xplore	28	3
SpringerLink	17	3
AIS electronic library	22	0
Total	67	6

At the end of this process, only 6 papers remained for further analysis. Many hits had to be excluded because they were not addressing production networks but single organizations or because they used knowledge management and knowledge reuse only as a motivation for the development of a very specific system or technology without showing applicability or real-world use. Table 9 presents the papers which were analyzed in detail.

Table 9. Papers retrieved in the literature analysis

No.	Paper	Source
1	Y. Zhang and Y. Jin, "Research on Knowledge Management for Group Enterprise in Cloud Manufacturing," <i>Computer Science & Service System (CSSS), 2012 International Conference on</i> , Nanjing, 2012, pp. 1946-1950.	IEEE xplore
2	Chunli Yang and Hao Li, "A framework of product knowledge management supporting product agile customization design," <i>Service Operations and Logistics, and Informatics, 2008. IEEE/SOLI 2008. IEEE International Conference on</i> , Beijing, 2008, pp. 308-313.	IEEE xplore
3	M. Takahashi, J. I. Oono, K. Saitoh and S. Matsumoto, "Reusing makes it easier: manufacturing process design by CBR with KnowledgeWare," in <i>IEEE Expert</i> , vol. 10, no. 6, pp. 74-80, Dec 1995.	IEEE xplore
4	G. Bruno, D. Antonelli, R. Korf, J. Lentens, N. Zimmermann (2014) Exploitation of a Semantic Platform to Store and Reuse PLM Knowledge. <i>Advances in Production Management Systems, Volume 438, IFIP Advances in Information and Communication Technology</i> , pp 59-66. Springer.	Springer Link
5	R. Furian et al. (2013) Knowledge Management in Set Based Lean Product Development Process. <i>Advances in Production Management Systems, Volume 397, IFIP Advances in Information and Communication Technology</i> , pp 368-375, Springer.	Springer Link
6	M. Bricogne, F. Belkadi, M. Bosch-Mauchand, B. Eynard (2010) Knowledge Based Product and Process Engineering Enabling Design and Manufacture Integration. <i>Advances in Production Management Systems, Volume 338, IFIP Advances in Information and Communication Technology</i> , pp 473-480, Springer.	Springer Link

Analysis of the retrieved papers focused on identifying the knowledge reuse technique described in the paper and classifying it with the approach presented in the third Section. The result of this classification is shown in Table 10.

The most important finding of the literature review is that there is not much research available on knowledge reuse in production networks (RQ1). Only 68 papers as a result of the search is quite a low number. The same is true for the 6 papers found relevant. The published approaches focus on framework or module development, which in most cases have not entered the validation phase yet. The dominant scope considered is product knowledge.

Table 10. Classification of knowledge reuse techniques in the papers resulting from the literature review

Criterion	Classification of papers from literature review					
	#1	#2	#3	#4	#5	#6
Reuse Techniq.	Fr.work	Fr.work	Module	Fr.work	Module	Fr.Work
Reuse Situation	Shar. work proc.	Exp.-seek. nov.	Exp.-seek. nov.	Shar. work proc.	Exp.-seek. nov.	Exp.-seek. nov.
Capacity of KR approach	Shar. conc. mod.	Shar. conc. mod.	Shar. conc. mod.	Shar. conc. mod.	Shar. conc. mod.	Shar. conc. mod.
Address. of knowldg.	Organ.	Organ.	Indiv.	Organ.	Indiv.	Organ.
Scope of the knowldg.	Product, proc.	Product	Product	Product	Product	Product, proc.
Phase of solution develop.	Design	Design	Spec.	Spec.	Spec.	Design
Validat. status of approach	Internal	Internal	Internal	External, valid. cntxt	Internal	Internal

4.2. SME production network example. In order to illustrate the use of the classification approach for investigating knowledge reuse approaches in SME production networks, this Section will briefly introduce an example of such a network. The example was one of the industrial case studies on distributed product development in the MAPPER project [42] and is based on a networked organization from automotive supplier industry. The network consists of independent companies in the automotive domain who cooperate in product design and development and also coordinate their activities for production and delivery. Organizations of this form use information technology to extend their value creation possibilities [43] and establish various links across their organizational boundaries to achieve the joint objective [44].

The leading partner in the example network is a first tier automotive supplier from Sweden with its business area “seat comfort systems and components”, working with development and manufacturing of products for trucks and cars world-wide. The products considered in the example are seat comfort products, like seat heater, ventilation for seats, lumber support and head restraint. Typical development processes of products in this business area encompass elicitation of system requirements based on requirements from car or truck manufacturers; functional specification; development of product architecture (logical and technical components); co-design of hardware, software, elec-

trical and mechanical components; component and integration testing; and production planning including production logistics, product line and floor planning.

The first tier supplier performs this process in a geographically distributed setting, which involves engineers and experts at different locations in Scandinavia, which also includes SMEs. Many seat comfort systems and components are developed in product families, i.e., various versions exist and have to be maintained and specialized for different product variations made for different customers. In this context, fast and flexible engineering processes and the possibility to concurrently perform forward-engineering processes for different product variants is of crucial importance. In this context, information sharing and smooth reuse of knowledge from earlier product versions and network partners are key factors for efficient processes.

Figure 1 shows a typical collaboration set-up for engineering seat comfort components in the example network. The customer for a new variant of a seat heater is an OEM (Original Equipment Manufacturer) for cars or trucks. The first tier supplier receives the order for engineering and manufacturing the seat comfort sub-systems for a new vehicle model. From the first tier supplier perspective, this order usually leads to a new variant in a product family. Several sub-suppliers and partners are involved in the engineering and production network, with responsibility for specific components, like the carrier cover and carrier material or the copper wires for the heating coil, or for selected services, like the controller design or manufacturing of the relay unit. The first tier supplier organizes and monitors the overall design process, contributes own components and engineering steps, and is responsible for the system integration.

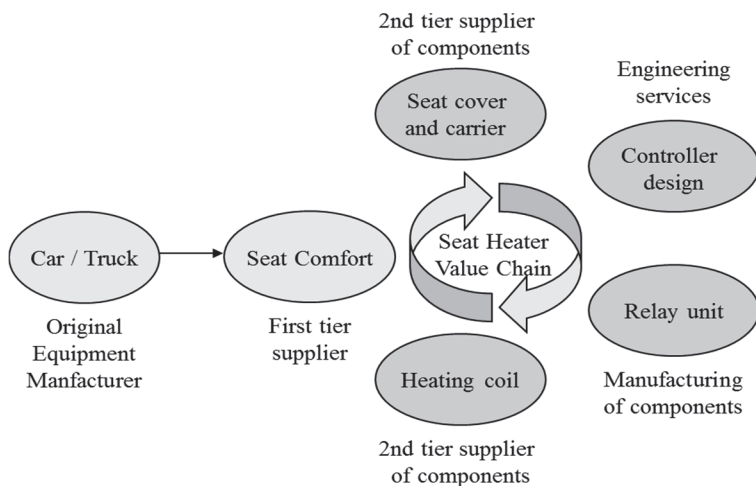


Fig. 1. Example supply network in collaborative product engineering

Enterprise engineering frameworks, such as GERAM [45], recommend using enterprise models or partial enterprise models for capturing proven structures of how to organize processes, what actors and roles are required, and the specific resources needed for a certain task. One of the problems encountered when representing relevant knowledge of production network members with partial enterprise models for each network member is to identify the integration points between the individual partial models, i.e. the processes where collaboration takes place and what actors and resources are involved.

In this context, the concept of a “connector view” was developed with the intention to contribute to solving the problems with interconnecting collaboration processes and give a “network-wide view” of the collaboration. As a complement to the partial enterprise models, the connector view is a model which captures collaboration elements, i.e. a model solely focused on processes, actors and resources which constitute collaborative situations. For a defined partnership in a production network, the relevant partial enterprise models are integrated with help of the connector view which results in a model for the collaboration of the established partnership with cross-enterprise collaboration processes and information flows (see [46] for more details).

When classifying partial enterprise models and the connector view with the approach presented in the third Section, it shows that basically two techniques are used: the partial enterprise models are reused by instantiating them, i.e. they have to be considered as patterns; the connector views are blueprints for what to integrate in creating collaborative processes, which makes them templates.

Since partial enterprise models and connector views are meant for sharing experiences between enterprise engineers about how procedures or tasks should be designed, the reuse situation is “shared work procedures”. These patterns are meant to capture not only a conceptual model, but all information for problem solving, which shows the capacity of the approach. Partial enterprise models will be used in organizations engaging in a collaboration, which makes organizations the primary addressee of the knowledge. The scope of the knowledge is “process” and “organization structures”, as partial enterprise models are used to describe these two aspects of organizations. The use of the knowledge for designing the way of collaboration indicates that the development phase addressed is “design”. As partial enterprise models and connector views were used in a number of real-world application contexts by people external to the development teams, the validation status of the approach is “external, in application context”. The result of the classification is shown in Table 11.

Table 11. Classification of reuse in the sample SME production network

Criterion	Classification of knowledge reuse approach used in SME network
Reuse Technique	Pattern and template
Reuse Situation	Shared work procedures
Capacity of knowledge reuse approach	Problem solving reuse
Addressee of knowledge	Organization
Scope of the knowledge	Knowledge about processes and organization structure
Phase of solution development	Design
Validation status of the approach	External, in application context

5. Validation of the Classification Approach. Already in Section 4 the knowledge reuse classification approach (Section 3) was applied when categorizing what knowledge reuse approaches are relevant for SME production networks. However, in the previous Section the developers of the categorization applied the approach, i.e. it was an internal validation of the approach. In contrast to the previous Section, this Section will take an external perspective when validating the classification approach, i.e. persons from outside the development team will use and evaluate the approach. The purpose is to check whether the knowledge reuse classification is applicable when practitioners investigate reuse in SME production networks.

In previous validation attempts [10], the classification criteria have been applied for technological and organizational approaches from computer science and business information systems. If we want to meet our ambition to support practitioners in selecting the right technique, the criteria have to be understandable even in this context. At the same time, performing the classification will – at least for the given selection of papers – show what knowledge reuse techniques actually are in use in SME networks and which potentially should receive more attention.

The validation requires that the approach under consideration is applied and evaluated by actors which were not involved in developing it. Thus, the evaluation of knowledge reuse approaches in SME networks was performed in two seminars at different occasions with different student groups in different educational settings. The first seminar was organized in autumn 2014 in a master course on Knowledge Representation at Rostock University, Germany. Participants were 12 master students, all of them with a Bachelor in Business Information Systems. Seminar 2 took place as part of a summer school in spring 2015 at Berlin University of Technology. Participants were more than 20 PhD students and master students. Both seminars followed the same set-up and work process:

- a 4 hour time frame was arranged, which consisted of 1,5 hours lecture, 1,5 hours group work and one hour discussion of the group work results;

– the lecture introduced the term knowledge reuse, related areas from knowledge management and knowledge engineering, examples for knowledge reuse techniques and the classification approach, i.e., the lecture basically had the same content as the first four Sections of this paper;

– the group work part had the task for each group to use the classification approach for investigating and classifying the technique of knowledge reuse applied in a given SME network. Each of the SME networks to be investigated was documented in a scientific publication. The participants formed groups of two or three students and selected themselves which SME network to work on. No group was allowed to take the same paper as another group. The papers selected for the group work are listed in Table 12;

Table 12. Papers on SME networks selected for the seminars

No.	Paper
1	Corso, M., Martini, A., Paolucci, E. and Pellegrini, L. (2003), “Knowledge management configurations in Italian small to medium enterprises”, <i>Integrated Manufacturing Systems</i> , Vol. 14 No. 1, pp. 45-56. Dominant approach: inter-personal relationships
2	Wenger, E. (1998), <i>Communities of Practice: Learning, Meaning and Identity</i> , Cambridge University Press, Cambridge. Dominant approach: technical and organizational infrastructure and self-organization in the community
3	Dyer, J.H. and Nobeoka, K. (2000), “Creating and managing a high-performance knowledge sharing network: the Toyota case”, <i>Strategic Management Journal</i> , Vol. 21, pp. 345-67. Dominant approach: establish learning processes and knowledge sharing structures
4	Sandkuhl K., Smirnov A., Henoch B. (2004) “Towards Knowledge Logistics in Agile SME Networks - Technological and Organizational Concepts”. In: Dolgui A., Soldek J., Zaikin O. “Supply chain optimisation: product/process design, facility location and flow control”. Kluwer Academic publishing, ISBN 1-4020-8081-6. Dominant approach: use application ontology to capture competences of network partners
5	Sandkuhl, K. (2010) <i>Capturing Product Development Knowledge with Task Patterns: Evaluation of Economic Effects</i> . Quarterly Journal of Control & Cybernetics, Issue 1, 2010. Systems Research Institute, Polish Academy of Sciences.
6	Peças, P., & Henriques, E. (2006). Best practices of collaboration between university and industrial SMEs. <i>Benchmarking: An International Journal</i> , 13(1/2), 54-67. Dominant approach: best practice descriptions
7	Yew Wong, K. (2005). Critical success factors for implementing knowledge management in small and medium enterprises. <i>Industrial Management & Data Systems</i> , 105(3), 261-279. Dominant approach: implement management support and organizational structures
8	K. Sandkuhl, V. Tarasov (2010) <i>Comparison of Approaches for Competence Demand Modeling in Flexible Supply Networks</i> . Logistics and Supply Chain Management: German-Russian Perspectives, Proceedings of the 5. German-Russian Logistics Workshop. St. Petersburg, May 2010, ISBN 978-5-7422-2585-0. Dominant approach: competence descriptions

– the discussion of the group work results consisted for each group of a short description of the publication analyzed and the classification reached. This classification was discussed with the other seminar participants. Furthermore, each group had the explicit task to reflect on suitability of the different classification criteria for the given purpose, on the applicability of the criteria, i.e., are the criteria described in a way which allows to clearly distinguish the different categories, and whether criteria or aspects for classification were missing or superfluous. In seminar 1, the participants had to summarize their results in a short report; in seminar 2, the results were captured during discussion.

The results of the group work in the three seminars are summarized in Table 13 regarding the classifications which were detected for each technique.

Table 13. Summary of the classification results from all seminars for the papers listed in Table 5

Paper no.	Reuse Technique	Reuse Situation	Capacity	Addressee	Scope	Phase of Development	Validation status of Approach
1	1: template 2: none	1,2: shared work practitioners	1,2: none	1,2: individual	1,2: process, artefact	1,2: all phases	1,2: external, in application context
2	1: template 2: template	1,2: shared work procedures	1,2: vocabulary	1,2: group	1,2: process, organization or artefact	1,2: all phases	1,2: external, in application context
3	1,2: none	1,2: shared work practitioners	1,2: none	1,2: organization	1,2: process, organization	1,2: all phases	1,2: external, in application context
4	1: model 2: template	1,2: expert seeking novices	1,2: conceptual model	1: organization	1,2: IT-artefact	1,2: analysis + design	1: internal, in validation context
5	1: pattern 2: template	1,2: shared work procedures	1, 2: problem solving	1,2: organization	1,2: process, org., product, IT	1,2: design	1,2: external, in application context
6	1,2: pattern	1,2: expertise-seeking novices	1,2: concept. model	1,2: individual	1,2: organization, process	1,2: analysis, design	1,2: external, in application context
7	1,2: none	1,2: shared work practitioners	1,2: one	1,2: organization	1,2: process, organization	1,2: all phases	1,2: external, in application context
8	1,2: template	1,2: expert seeking novices	1,2: conceptual model	1,2: individual	1: organization 2: none	1,2: analysis	1,3: external, validation context

Due to the different number of participants and due to the possibility for each group to select their publication to evaluate, some papers were classified by two different groups simultaneously. Regarding the suitability of the classification criteria, the participants of the seminar confirmed that it was possible to use the criteria for analyzing the characteristics of knowledge reuse techniques and to classify the techniques described in the provided papers.

The classification results discussed above and shown Table 13 support this impression. For the applicability, most criteria were perceived as sufficiently clear defined and applicable in practical use: reuse technique, reuse situation, capacity of knowledge representation, validation status, and phase of solution development. The criterion which received criticism in seminar 2 was the scope of the knowledge. The participants of this seminar expressed that the product and process perspective were not sufficiently distinguishable, which was solved by additional explanations by the teacher during the seminar. Seminar 1 did not raise this question, probably because they both had a solid education in enterprise modeling which emphasizes the distinction between product and process knowledge. The implication for the classification approach is that the aspect should be more clearly explained and illustrated with examples.

Criticism from both seminars was expressed regarding the target group criterion “addressee”. A knowledge representation technique suitable for an individual in his daily work also will be of use for the organization this individual is working with. On the other side, knowledge meant for the organization will usually be applied by the individuals in the organization. In order to : If the knowledge reuse technique cannot be applied by an individual alone but need organizational structures, like roles or processes, than the technique is to be classified as meant for organizations, not for individuals.

6. Discussion: Knowledge Reuse Types relevant for SME Production Networks. The example network presented in the third Section of the paper investigated the need for knowledge reuse of an industrial network in collaborative product engineering. The conclusion from this case was that the reuse techniques relevant for the network were “patterns” and “templates” with the purpose to capture “shared work procedures” as the reuse situation. The scope of knowledge to be reused concerned “processes” and “organization structures” with the addressee being the “organization” as such. The capacity required of the reuse approach is to support “problem solving”.

Although this situation concerns only the knowledge reuse in one specific production network, it can be used as a starting point or initial hypothesis what typical knowledge reuse needs of networks might be. Validation of such a hypothesis should be done by either studying existing infor-

mation about networks, or the currently existing networks themselves, or both. As studying the network themselves would not be realistic due to the efforts involved and the need to make all such networks cooperate, we propose to in the first step focus on published information.

In the previous Section, we studied the available information about knowledge reuse in such networks by identifying published work in the field and by using our classification approach. In this context, it was important not to ask the developers of the classification approach to evaluate the identified papers but to use analytically trained people from outside the development team, in this case two student groups.

The results of this work are summarized in Table 13 which shows the knowledge reuse classification for the identified papers. When evaluating the results from the perspective of our hypothesis, we put specific weight on papers and cases that have the maturity level of being applied in practice (i.e., “external, in application context”). Regarding the reuse technique, these papers confirmed the hypothesis from the industrial case that templates and patterns are relevant, but they also show that, in a number of cases, no technique at all is applied. In these cases of no visible technique, the capacity of knowledge reuse achieved also is “none” – which is not surprising but indicates that in these cases no reuse approach for explicit knowledge was used at all but that these cases basically address sharing implicit knowledge. This impression is supported by the reuse situation found in these cases which is “shared work practitioners”, i.e. the practitioners exchanging knowledge face-to-face without explicating it. The reuse situation commonly supported by template or pattern as reuse technique is “shared work procedures” – which also was the case in the industrial case study.

Regarding the capacity of the knowledge reuse approach, there is no clear picture from the analysis of the papers: vocabulary, conceptual model and problems solving (like in the industrial case) can be found. The most frequent addressee of the knowledge in the literature cases is the organization, but also individuals are seen as addressee. This confirms the hypothesis from the industrial case but also indicates that individuals should be added. The scope of the knowledge in all cases includes processes and in all but one case also includes organization structures, which confirms the hypothesis from the industrial case. When it comes to the phase of development, design always is included and in most cases all phases are relevant.

Table 14 summarizes our analysis on what kind of knowledge reuse approaches are of specific relevance for production networks and SME networks: templates or patterns capturing processes and organization structures for sharing of work procedures on the level of an organization or an individual role. This knowledge should be validated in a real-world application

context and is required for all phases of solution development with specific focus on the design phase.

7. Summary and Future Work. Starting from an existing classification approach for knowledge reuse techniques and a review of literature on knowledge reuse in SME production networks, the paper evaluated the classification approach for knowledge reuse techniques regarding its suitability for use in SME networks. The criteria included in the approach are reuse technique, reuse situation, capacity of knowledge representation, addressee of knowledge, validation status, scope and phase of solution development.

Table 14. Kinds of Knowledge Reuse relevant for SME production networks

Criterion	Classification of knowledge reuse approach used in SME network
Reuse Technique	Template and pattern
Reuse Situation	Shared work procedures
Capacity of knowledge reuse approach	All are relevant (no specific preference)
Addressee of knowledge	Individual, Organization
Scope of the knowledge	Knowledge about processes and organization structures
Phase of solution development	All phases (with specific importance on Design)
Validation status of the approach	External, in application context

The most important finding regarding knowledge reuse in SME production networks is that there is not much research available on this topic. The published approaches focus on framework or module development, which in most cases have not entered the validation phase yet. The dominant scope of the existing approaches is product knowledge. An application for this product-centric view could be that mainly physical products have been in focus of such networks whereas product-service combinations mostly are considered internally by enterprises. With an increasing number of service networks, this aspect might change which would result in an increased importance of the process view. Future work to this end should develop practice oriented reuse techniques for combined product and process knowledge ready-made for adaptations in SME. Even knowledge reuse approaches covering a combination of product, process, organization and systems perspective at the same time have to be considered, as these perspectives are mutually dependent.

Suitability and applicability of the classification approach for knowledge reuse techniques were evaluated by applying them on different knowledge reuse studies reported in research papers which by intention were selected from different areas of SME networks and by using them as part of

an assignment in different seminars in university education on PhD and master student level. The classification approach was perceived applicable, suitable and useful for the intended purpose. By analyzing the industrial case and the literature published about such cases, we also presented our view on those kinds of knowledge reuse in particular relevant for SME production networks.

One part of future work will be to perform various refinement and improvement activities of the classification approach:

- The criteria receiving criticism during application in the seminars need improvement

- The categorization for each individual criterion should be checked one more time for completeness. For this purpose an extensive literature study will be performed

- The way of how to perform the classification for a given knowledge reuse approach should be described in more detail as a guideline

Another important part of the future work will be to revisit the initial motivation for developing the classification: to support practitioners in finding and selecting the right knowledge reuse approach for a given problem or application scenario. For this purpose, much information included in the classification is supposed to be useful and required, like the reuse situation and the technique. However, it will be crucial to better understand the drivers and frame conditions of knowledge reuse in organizations. Probably, typical motivations like automation for higher efficiency or standardization as means to raise quality will not be sufficient. New application domains, such as inter-networked e-work, are considered as promising fields for knowledge reuse. New case studies in this field are expected to provide first insights [47].

References

1. Dyer J., Nobeoka K. Creating and managing a high performance knowledge-sharing network: the Toyota case. *Strategic management journal*. 2000. pp. 345–367.
2. Ernst D., Kim L. Global production networks, knowledge diffusion, and local capability formation. *Research policy*. 2002. vol. 31(8). pp. 1417–1429.
3. Phelps C., Heidl R., Wadhwa A. Knowledge, networks, and knowledge networks a review and research agenda. *Journal of Management*. 2012. vol. 38(4). pp. 1115–1166.
4. Azizi R., Maleki M., Moradi-Moghadam M., Cruz-Machado V. The Impact of Knowledge Management Practices on Supply Chain Quality Management and Competitive Advantages. *Management and Production Engineering Review*. 2016. vol. 7. no. 1. pp. 4–12.
5. Jakubowski J., Peterka J. Design for Manufacturing in Virtual Environment using Knowledge Engineering. *Management and Production Engineering Review*. 2014. vol. 5. no. 1. pp. 3–10.
6. Alavi M., Leidner D.E. Knowledge management systems: issues, challenges, and benefits. *Communications of the AIS*. 1999. vol. 1(2es). pp. 1.
7. Dalkir K. Knowledge management in theory and practice. Routledge. 2013. 372 p.
8. Studer R., Benjamins V.R., Fensel D. Knowledge engineering: principles and methods. *Data & knowledge engineering*. 1998. vol. 25(1). pp. 161–197.
9. Lillehagen F., Krogstie J. Active Knowledge Modelling of Enterprises. Springer. 2009. 436 p.
10. Sandkuhl K. Knowledge reuse: survey of existing techniques and classification approach. *Business Intelligence*. 2015. pp. 126–148.

11. Sandkuhl K., Lillehagen F. The Early Phases of Enterprise Knowledge Modeling: Practices and Experiences from Scaffolding and Scoping. IFIP Working Conference on The Practice of Enterprise Modeling (IFIP PoEM 2008). 2008. pp. 1–14.
12. Fong M. E-Collaborations and Virtual Organizations. IRM Press. 2005. 300 p.
13. Möller K., Rajala A., Svahn S. Strategic business nets – their type and management. *Journal of Business Research*. 2005, vol. 58, no. 9. pp. 1274–1284.
14. Kohtamäki M., Vesalainen J., Varamäki E., Vuorinen T. The governance of partnerships and a strategic network. *Management Decision*. 2006. vol. 44, no. 8. pp. 1031–1051.
15. Valkokari K., Helander N. Knowledge management in different types of strategic SME networks. *Management Research News*. 2007. pp. 597–608.
16. Lau T., Sure Y. Introducing Ontology-based Skills Management at a Language Insurance Company. Proceedings of the Modellierung. 2002. pp. 123–134.
17. Sandkuhl K., Billig A. Ontology-based Artefact Management in Automotive Electronics. *International Journal for Computer Integrated Manufacturing (IJCIM)*. 2007. vol. 20(7). pp. 627–638.
18. Lybaert N. The Information Use in a SME: its Importance and Some Elements of Influence. *Small Business Economics*. 1998. vol. 10(2). pp. 171–191.
19. Levy M., Powell P., Yetton, P. The Dynamics of SME Information Systems. *Small Business Economics*. 2002. vol. 19(4). pp. 341–354.
20. Probst G., Raub S., Romhardt K. Managing Knowledge – Building Blocks for Success. John Wiley & Sons, 2000. 368 p.
21. Nonaka I., Takeuchi H. The Knowledge-Creating Company: How Japanese Companies Create the Dynamics of Innovation. Oxford university press. 1995. 304 p.
22. Maier R., Hädrich T., Peinl R. Enterprise Knowledge Infrastructures: 2nd Edition. Springer. 2010. 460 p.
23. Lamberts K., Shanks D. Knowledge Concepts and Categories. Psychology Press. 2013. 478 p.
24. Smirnov A., Sandkuhl K., Shilov N. Multilevel Self-Organization and Context-Based Knowledge Fusion for Business Model Adaptability in Cyber-Physical Systems. IFAC Proceedings Volumes. 2013. vol. 46, no. 9. pp. 2045–2050.
25. Markus M. Lynne. Toward a Theory of Knowledge Reuse: Types of Knowledge Reuse Situations and Factors in Reuse Success. *Journal of Management Information Systems*. 2001. vol. 18, no. 1. pp. 57–93.
26. Delone W. The Delone and Mclean model of information systems success: a ten-year update. *Journal of management information systems*. 2003. vol. 19(4). pp. 9–30.
27. Jennex M., Olfman L. A model of knowledge management success. *International Journal of Knowledge Management (IJKM)*. 2006. vol. 2(3). pp. 51–68.
28. Sandkuhl K., Stirna J., Persson A., Wißotzki M. Enterprise Modeling: Tackling Business Challenges with the 4EM Method. Springer. 2014. 309 p.
29. Sandkuhl K. Organizational Knowledge Patterns – Definition and Characteristics. Proceedings of the International Conference on Knowledge Management and Information Sharing. 2011. pp. 230–235.
30. Blomqvist E., Sandkuhl K. Patterns in Ontology Engineering – Classification of Ontology Patterns. Proc. 7th International Conference on Enterprise Information Systems. 2005. pp. 413–416.
31. Sandkuhl K. et al. Ontology Construction in Practice – Experiences and Recommendations from Industrial Cases. 9th International Conference on Enterprise Information Systems. 2007. pp. 250–256.
32. Wißotzki M. et al. State of Research in Reuse of Enterprise Models: Systematic Literature Analysis of CAISE, EMMSAD, ICIS and INCOM. IADIS International Conference Information Systems 2012. pp. 82–90.
33. Hammer K., Sandkuhl K. The State of Ontology Pattern Research: A Systematic Review of ISWC, ESWC and ASWC 2005-2009. Proceedings of the 2nd International Conference on Ontology Patterns. 2010. vol. 671. pp. 5–18.

34. Sandkuhl K. Organizational Knowledge Patterns: Foundation and Application Example. Operations Research and Data Mining (ORADM-2012). 2012.
35. Newell A. The knowledge level. Artificial intelligence. 1982. vol. 18. no. 1. pp. 87–127.
36. Musen M.A. Dimensions of Knowledge Sharing and Reuse. *Computers and Biomedical Research*. 1992. vol. 25. pp. 435–467.
37. Vernadat F.B. Enterprise Modelling and Integration. Enterprise Inter-and Intra-Organizational Integration. 2003. pp. 25–33.
38. Lillehagen F. The Foundations of AKM Technology. Proceedings 10th International Conference on Concurrent Engineering (CE) Conference. 2003. pp. 619–629.
39. Boehm B.W.A spiral model of software development and enhancement. *IEEE Computer*. 1988. vol. 21(5). pp. 61–72.
40. Lincoln Y., Guba E. Naturalistic Inquiry. Sage Publications. 1985. 416 p.
41. Kitchenham B. Guidelines for Performing Systematic Literature Reviews in Software Engineering. EBSE Technical Report. University of Durham. 2007. 57 p.
42. Johnsen S. et al. Model-based Adaptive Product and Process Engineering. New Technologies for the Intelligent Design and Operation of Manufacturing Networks. 2007. vol. 42. pp. 7–27.
43. Laudon K. C., Laudon J. P. Management Information Systems: Organization and Technology in the Networked Enterprise. Prentice Hall International. 1999. 588 p.
44. Skyrme D. The Networked Organization. Management Insights. Available at: <http://www.skyrme.com/insights/Inetorg.htm>. (accessed: 15.11. 2008).
45. The Generalized Enterprise Reference Architecture and Methodology. Handbook on Enterprise Architectures. 2003. pp. 21–63.
46. Carstensen A. et al. Knowledge Supply for SME Networks: Application Cases and Selected Technical Approaches. E-Business Issues Challenges and Opportunities for SMEs: Driving Competitiveness. IGI Publishing. 2011. pp. 149–172.
47. Zhong H., Levalle R.R., Moghaddam M., Nof S. Collaborative Intelligence – Definition and Measured Impacts on Internetworked E-Work. Management and Production Engineering Review. 2015. vol. 6. no. 1. pp. 67–78.
48. Smirnov A.V., Levashova T.V., Pashkin M.P. [Models of context-aware decision support systems in dynamic structured domains]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*. 2009. vol. 9. pp. 116–147. (In Russ.).
49. Smirnov A.V., Pashkin M.P., Levashova T.V., Shilov N.G. [Main organisational principles of the rapid knowledge fusion systems]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*. 2002. vol. 1. Issue. 2. pp. 38–50. (In Russ.).
50. Smirnov A., Sheremetov L., Sanchez C., Shilov N. Dynamic Configuration of Agile Supply Networks Based on Semantic Service Composition. *Journal of Production Research*. Taylor & Francis. 2013. vol. 51. Issue 7. pp. 2160–2175.
51. Alvarado M., Romero M., Sheremetov L. Corporative Memory Based on the User Profiles. *Journal of Expert Systems with Applications*. Pergamon Press. 2004. vol. 26(1). pp. 87–94.

Sandkuhl Kurt — Ph.D., full professor of business information systems department, The University of Rostock (Germany). Research interests: enterprise modelling, enterprise architecture management, knowledge engineering, digital business models, digital business architectures, information logistics. The number of publications — 399. kurt.sandkuhl@uni-rostock.de; 22, Albert-Einstein-Str., Rostock, Germany, 18057; office phone: +49(381) 498-7400, Fax: +49(381)498-7512.

Smirnov Alexander Viktorovich — Ph.D., Dr. Sci., professor, head of computer aided integrated systems laboratory, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of Russian Academy of Sciences (SPIIRAS). Research interests: intelligent configuration management of virtual & networked organizations and knowledge logistics. The number of publications — 400. smir@iiias.spb.su; 39, 14-th Line V.O., St. Petersburg, 199178, Russia; office phone: +7(812)328-2073, Fax: +7(812)328-4450.

Acknowledgments. This research is supported by RSF (project no. 15-18-30048).

К. ЗАНДКУЛЬ, А.В. СМИРНОВ
**УПРАВЛЕНИЕ ЗНАНИЯМИ В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СЕТЯХ:
 КЛАССИФИКАЦИЯ И ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ПОВТОРНОГО
 ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЗНАНИЙ**

Зандкуль К., Смирнов А.В. Управление знаниями в производственных сетях: классификация и технологии для повторного использования знаний.

Аннотация. Многие исследования в области управления знаниями указывают на то, что предприятия и организации, поддерживающие систематический обмен, передачу и повторное использование знаний, могут рассчитывать на значительные выгоды. Однако не так много исследований выполнено в рамках анализа технологий для повторного использования знаний, которые применяются в организациях. Исходя из классификации подходов к повторному использованию знаний, в статье рассматривается состояние в этой области применительно к производственным сетям (с уделением особого внимания сетям малых и средних предприятий - МСП). Цель статьи двоякая: для производственных сетей это исследование того, какие виды повторно используемых знаний (с точки зрения разрабатываемой классификации) наиболее актуальны для таких сетей; для подхода к классификации методов повторного использования знаний это уточнение данного подхода и его обоснование применительно к производственным сетям. Основными результатами статьи являются: (1) анализ ситуаций повторного использования знаний в сетях МСП, (2) оценка предложенного подхода к классификации методов повторного использования знаний применительно к различным ситуациям и (3) дальнейшее уточнение и валидация предложенного подхода.

Ключевые слова: трансфер знаний, представление знаний, производственные сети, сети МСП.

Зандкуль Курт — к-т техн. наук, профессор кафедры бизнес-ориентированных информационных систем, Университет Росток (Германия). Область научных интересов: моделирование предприятий, управление архитектурой предприятий, инжиниринг знаний, цифровые бизнес модели, архитектуры цифрового бизнеса, логистика информации. Число научных публикаций — 399. kurt.sandkuhl@uni-rostock.de; ул. Альберта Эйнштейна, 22, Росток, 18057, Германия; р.т.: +49(381) 498-7400, Факс: +49(381)498-7512.

Смирнов Александр Викторович — д-р техн. наук, профессор, заведующий лабораторией интегрированных систем автоматизации, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН). Область научных интересов: интеллектуальное управление конфигурациями виртуальных и сетевых организаций, логистика знаний. Число научных публикаций — 400. smir@iias.spb.su; 14-я линия В.О., 39, Санкт-Петербург, 199178; р.т.: +7(812)328-2073, Факс: +7(812)328-4450.

Поддержка исследований. Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 15-18-30048).

Литература

1. *Dyer J., Nobeoka K.* Creating and managing a high performance knowledge-sharing network: the Toyota case // *Strategic management journal*. 2000. pp. 345–367.
2. *Ernst D., Kim L.* Global production networks, knowledge diffusion, and local capability formation // *Research policy*. 2002. vol. 31(8). pp. 1417–1429.
3. *Phelps C., Heidl R., Wadhwa A.* Knowledge, networks, and knowledge networks a review and research agenda // *Journal of Management*. 2012. vol. 38(4). pp. 1115–1166.

4. *Azizi R., Maleki M., Moradi-Moghadam M., Cruz-Machado V.* The Impact of Knowledge Management Practices on Supply Chain Quality Management and Competitive Advantages // *Management and Production Engineering Review*. 2016. vol. 7. no. 1. pp. 4–12.
5. *Jakubowski J., Peterka J.* Design for Manufacturing in Virtual Environment using Knowledge Engineering // *Management and Production Engineering Review*. 2014. vol. 5. no. 1. pp. 3–10.
6. *Alavi M., Leidner D.E.* Knowledge management systems: issues, challenges, and benefits // *Communications of the AIS*. 1999. vol. 1(2es). pp. 1.
7. *Dalkir K.* Knowledge management in theory and practice // Routledge. 2013. 372 p.
8. *Studer R., Benjamins V.R., Fensel D.* Knowledge engineering: principles and methods // *Data & knowledge engineering*. 1998. vol. 25(1). pp. 161–197.
9. *Lillehagen F., Krogstie J.* Active Knowledge Modelling of Enterprises // Springer. 2009. 436 p.
10. *Sandkuhl K.* Knowledge reuse: survey of existing techniques and classification approach // *Business Intelligence*. 2015. pp. 126–148.
11. *Sandkuhl K., Lillehagen F.* The Early Phases of Enterprise Knowledge Modeling: Practices and Experiences from Scaffolding and Scoping // *IFIP Working Conference on The Practice of Enterprise Modeling (IFIP PoEM 2008)*. 2008. pp. 1–14.
12. *Fong M.* E-Collaborations and Virtual Organizations // IRM Press. 2005. 300 p.
13. *Möller K., Rajala A., Svahn S.* Strategic business nets – their type and management // *Journal of Business Research*. 2005, vol. 58. no. 9. pp. 1274–1284.
14. *Kohtamäki M., Vesalainen J., Varamäki E., Vuorinen T.* The governance of partnerships and a strategic network // *Management Decision*. 2006. vol. 44. no. 8. pp. 1031–1051.
15. *Valkokari K., Helander N.* Knowledge management in different types of strategic SME networks // *Management Research News*. 2007. pp. 597–608.
16. *Lau T., Sure Y.* Introducing Ontology-based Skills Management at a Language Insurance Company // *Proceedings of the Modellierung*. 2002. pp. 123–134.
17. *Sandkuhl K., Billig A.* Ontology-based Artefact Management in Automotive Electronics // *International Journal for Computer Integrated Manufacturing (IJCIM)*. 2007. vol. 20(7). pp. 627–638.
18. *Lybaert N.* The Information Use in a SME: its Importance and Some Elements of Influence // *Small Business Economics*. 1998. vol. 10(2). pp. 171–191.
19. *Levy M., Powell P., Yetton, P.* The Dynamics of SME Information Systems // *Small Business Economics*. 2002. vol. 19(4). pp. 341–354.
20. *Probst G., Raub S., Romhardt K.* Managing Knowledge – Building Blocks for Success // John Wiley & Sons, 2000. 368 p.
21. *Nonaka I., Takeuchi H.* The Knowledge-Creating Company: How Japanese Companies Create the Dynamics of Innovation // Oxford university press. 1995. 304 p.
22. *Maier R., Hädrich T., Peinl R.* Enterprise Knowledge Infrastructures: 2nd Edition // Springer. 2010. 460 p.
23. *Lamberts K., Shanks D.* Knowledge Concepts and Categories // Psychology Press. 2013. 478 p.
24. *Smirnov A., Sandkuhl K., Shilov N.* Multilevel Self-Organization and Context-Based Knowledge Fusion for Business Model Adaptability in Cyber-Physical Systems // *IFAC Proceedings Volumes*. 2013. vol. 46. no. 9. pp. 2045–2050.
25. *Markus M., Lynne.* Toward a Theory of Knowledge Reuse: Types of Knowledge Reuse Situations and Factors in Reuse Success // *Journal of Management Information Systems*. 2001. vol. 18. no. 1. pp. 57–93.
26. *Delone W.* The Delone and Mclean model of information systems success: a ten-year update // *Journal of management information systems*. 2003. vol. 19(4). pp. 9–30.
27. *Jennex M., Olfman L.* A model of knowledge management success // *International Journal of Knowledge Management (IJKM)*. 2006. vol. 2(3). pp. 51–68.
28. *Sandkuhl K., Stirna J., Persson A., Wißbotzki M.* Enterprise Modeling: Tackling Business Challenges with the 4EM Method // Springer. 2014. 309 p.
29. *Sandkuhl K.* Organizational Knowledge Patterns – Definition and Characteristics // *Proceedings of the International Conference on Knowledge Management and Information Sharing*. 2011. pp. 230–235.

30. *Blomqvist E., Sandkuhl K.* Patterns in Ontology Engineering – Classification of Ontology Patterns // Proc. 7th International Conference on Enterprise Information Systems. 2005. pp. 413–416.
31. *Sandkuhl K. et al.* Ontology Construction in Practice – Experiences and Recommendations from Industrial Cases // 9th International Conference on Enterprise Information Systems. 2007. pp. 250–256.
32. *WiBotzki M. et al.* State of Research in Reuse of Enterprise Models: Systematic Literature Analysis of CAISE, EMMSAD, ICIS and INCOM // IADIS International Conference Information Systems 2012. pp. 82–90.
33. *Hammer K., Sandkuhl K.* The State of Ontology Pattern Research: A Systematic Review of ISWC, ESWC and ASWC 2005-2009 // Proceedings of the 2nd International Conference on Ontology Patterns. 2010. vol. 671. pp. 5–18.
34. *Sandkuhl K.* Organizational Knowledge Patterns: Foundation and Application Example // Operations Research and Data Mining (ORADM-2012). 2012.
35. *Newell A.* The knowledge level // Artificial intelligence. 1982. vol. 18. no. 1. pp. 87–127.
36. *Musen M.A.* Dimensions of Knowledge Sharing and Reuse // Computers and Biomedical Research. 1992. vol. 25. pp. 435–467.
37. *Vernadat F.B.* Enterprise Modelling and Integration // Enterprise Inter-and Intra-Organizational Integration. 2003. pp. 25–33.
38. *Lillehagen F.* The Foundations of AKM Technology // Proceedings 10th International Conference on Concurrent Engineering (CE) Conference. 2003. pp. 619–629.
39. *Boehm B.W.A* spiral model of software development and enhancement // IEEE Computer. 1988. vol. 21(5). pp. 61–72.
40. *Lincoln Y., Guba E.* Naturalistic Inquiry // Sage Publications. 1985. 416 p.
41. *Kitchenham B.* Guidelines for Performing Systematic Literature Reviews in Software Engineering. EBSE Technical Report. University of Durham. 2007. 51 p.
42. *Johnsen S. et al.* Model-based Adaptive Product and Process Engineering. New Technologies for the Intelligent Design and Operation of Manufacturing Networks. 2007. vol. 42. pp. 7–27.
43. *Laudon K.C., Laudon J.P.* Management Information Systems: Organization and Technology in the Networked Enterprise. Prentice Hall International. 1999. 588 p.
44. *Skyrme D.* The Networked Organization. Management Insights. URL: <http://www.skyrme.com/insights/1netorg.htm>. (дата обращения: 15.11. 2008).
45. The Generalized Enterprise Reference Architecture and Methodology. Handbook on Enterprise Architectures. 2003. pp. 21–63.
46. *Carstensen A. et al.* Knowledge Supply for SME Networks: Application Cases and Selected Technical Approaches. E-Business Issues Challenges and Opportunities for SMEs: Driving Competitiveness. IGI Publishing. 2011. pp. 149–172.
47. *Zhong H., Levalle R.R., Moghaddam M., Nof S.* Collaborative Intelligence – Definition and Measured Impacts on Internetworked E-Work. *Management and Production Engineering Review*. 2015. vol. 6. no. 1. pp. 67–78.
48. *Смирнов А.В., Левашова Т.В., Пашкин М.П.* Модели контекстно-управляемых систем поддержки принятия решений в динамических структурированных областях // Труды СПИИРАН. 2009. Вып. 9. С. 116–147.
49. *Смирнов А.В., Пашкин М.П., Левашова Т.В., Шилов Н.Г.* Основные принципы организации систем быстрой интеграции знаний // Труды СПИИРАН. Вып. 1. Т. 2. С. 38–50.
50. *Smirnov A., Sheremetov L., Sanchez C., Shilov N.* Dynamic Configuration of Agile Supply Networks Based on Semantic Service Composition // Journal of Production Research. Taylor & Francis. 2013. vol. 51. Issue 7. pp. 2160–2175.
51. *Alvarado M., Romero M., Sheremetov L.* Corporative Memory Based on the User Profiles // Journal of Expert Systems with Applications. Pergamon Press. 2004. vol. 26(1). pp. 87–94.

С.Н. КИРИЛЛОВ, В.Т. ДМИТРИЕВ
**КОМПЛЕКСНЫЙ АЛГОРИТМ ОБЪЕКТИВНОЙ ОЦЕНКИ
КАЧЕСТВА ДЕКОДИРОВАННОГО РЕЧЕВОГО СИГНАЛА ПРИ
ДЕЙСТВИИ АКУСТИЧЕСКИХ ПОМЕХ**

Кириллов С.Н., Дмитриев В.Т. Комплексный алгоритм объективной оценки качества декодированного речевого сигнала при действии акустических помех.

Аннотация. Рассматриваются алгоритмы объективной оценки качества речи, основанные на измерении динамических и статических характеристик речевых сигналов на выходе кодека источника. Обоснована функциональная схема проведения экспериментальных исследований. Приведены результаты анализа корреляции объективной и субъективной оценки качества речи. Предложены модификации показателя объективной оценки качества на основе корреляции возбуждения спектра MESC и модификации показателя на основе вычисления функции ощущения спектральной динамики MFOSD. Предложен алгоритм формирования кривых регрессии, позволяющий выполнить преобразование объективной оценки к шкале субъективной оценки качества речи.

На основании использования наиболее точных модификаций показателей оценки качества речи для восстановленных речевых сигналов предложен комплексный алгоритм объективной аппаратной оценки качества речи при воздействии на микрофон широкополосных и низкочастотных стационарных и нестационарных акустических помех. Показано, что применение комплексного алгоритма позволяет получить объективную оценку качества речи согласно ГОСТ Р 50840-95 со средней ошибкой не более 0,35 балла при отношениях сигнал-шум от 30 дБ до -10 дБ.

Ключевые слова: оценка качества речи, низкочастотное кодирование, канал связи, акустическая помеха.

1. Введение. В телекоммуникационных системах существует оперативная необходимость в объективной оценке качества речи для речевого сигнала (РС) на выходе кодека источника. Особенно это важно при функционировании системы в сложной быстро изменяющейся акустической помеховой обстановке. Кроме того, на качество речи оказывают существенное влияние искажения, возникающие в первичном кодере РС.

Одним из наиболее распространенных видов информации, передаваемых в телекоммуникационных системах, является речевая информация. Она занимает значительную часть трафика, передаваемого по современным сетям связи. Зачастую для уменьшения избыточности передаваемой по каналам связи речевой информации применяются вокодеры и полувокодеры, которые искажают исходный РС, кроме того на качество РС значительное влияние оказывают различные акустические помехи (АП).

В настоящее время субъективная оценка качества речи для восстановленного РС осуществляется в соответствии с методами,

описанными в ГОСТ Р 50840-95 «Передача речи по трактам связи. Методы оценки качества, разборчивости и узнаваемости» и ГОСТ Р 51061-97 «Системы низкоскоростной передачи речи по цифровым каналам. Параметры качества речи и методы измерений» [1, 2]. Данные методы требуют проведения значительного количества тестовых испытаний и создания голосовых баз данных большого объема, а также во многом зависят от профессионализма привлеченных экспертов. Кроме того, полученные оценки могут служить лишь первым приближением и не отражают изменения качества речи для восстановленного РС при действии АП [3] и искажений в кодеках РС.

Как показано в [4-6] существующие алгоритмы объективной аппаратной оценки качества восстановленного РС не обладают необходимой точностью и не могут в полной мере учитывать искажения, вносимые кодеками источника при действии АП.

В известных работах [7-21] не проведены подробные исследования алгоритмов объективной оценки качества восстановленного РС на выходе декодера РС при действии различных АП.

Поэтому необходимы исследования и обоснование комплексного алгоритма объективной оценки качества речи для декодированного РС, который учитывает наилучшие свойства известных алгоритмов оценки качества речи [22-25], а также изменение качества речи для восстановленного РС при действии АП на входе кодека источника.

Кодеки источника имеют разную чувствительность к действию АП, поэтому целесообразно производить совместную оценку качества речи с учетом АП и искажений РС в кодере и декодере источника.

Цель данной работы — исследование и обоснование комплексного алгоритма объективной оценки качества речи для декодированного РС при действии широкополосных и низкочастотных, стационарных и нестационарных АП на входе микрофона, а также искажений в кодеке источника.

2. Анализ известных алгоритмов объективной оценки качества речи. Существует ряд алгоритмов объективной оценки качества речи, основанных на измерении статических и динамических характеристик РС (например, коэффициента передачи, частотной и амплитудной характеристик, динамического диапазона и других) [6-19].

К этим алгоритмам относят показатели оценки качества речи во временной области (на основе среднеквадратического отклонения (СКО), отношения сигнал-шум (ОСШ), сегментного отношения сигнал-шум (ОСШ_{сег}), а также в частотной области (на основе расстояния Итакура-

Саито (Itakura-Saito Distance — ISD), показателя искажения спектра барков (Bark Spectral Distortion — BSD), модифицированной оценки искажения спектра барков (Modified Bark Spectral Distortion — MBSD), расхождения COSH (COSH Distance — COSH), искажения фазового спектра (Spectral Phase Distortion — SP), корреляции возбуждения спектра (Excitation Spectral Correlation — ESC), искажения спектра (Spectral Distortion — SD)), кроме того используются показатели оценки на основе методов психоакустического анализа (Perceptual Evaluation of Speech Quality — PESQ) [7] и ряд других [5-19].

В [4, 5] дан подробный обзор показателей оценки качества речи во временной и частотной области. Проанализированы такие показатели, как ОСШ, ОСШ_{ср}, ISD, COSH, SP, ISD, ESC. В [5] отдельно рассмотрены пять различных моделей психоакустической предварительной обработки для оценки качества речи в низкоскоростных кодеках.

В работе [7] рассмотрены различные алгоритмы оценки качества речи при передаче речевых пакетов, которые используются при исследовании надежности сети NGN. В частности, рассмотрен показатель «рассчитываемого планируемого параметра ухудшения» ICPIF (Calculated Planning Impairment Factor).

В работе [8] в качестве меры искажения РС принимается спектральное отклонение SD, а также модификация данного показателя MBSD. В дальнейшем для оценки качества речи предложен показатель при котором используется значимость критических полос. В [9] обоснована дальнейшая модификация показателя оценки качества речи — EMBSD. В работе [10] проведен анализ основных показателей оценки качества речи и их классификация как показателей на основе восприятия, а также других показателей во временной и частотной области. Приведены девятнадцать показателей качества речи для восстановленного РС.

В работе [11] исследованы семь показателей качества речи на выходе двенадцати различных систем кодирования, а также без кодирования при воздействии аддитивного белого шума на входе системы. Для отдельных отношений сигнал-шум и кодеков получены значения корреляции объективных и субъективных оценок. В результате эксперимента показано [11], что наилучшие характеристики обеспечивают алгоритм на основе автоматического распознавания речи ASR и алгоритм PESQ.

В работе [12] рассмотрены методические вопросы по оценке качества синтезированной речи, показаны основные проблемы и предложены возможные решения. В [13] приведен алгоритм оценки

интегрального значения отношения сигнал-шум и его значений в частотных полосах для определения качества фонограмм. В [14] рассмотрены методы оценки качества при потере пакетов. Проведен корреляционный анализ объективных и субъективных показателей оценки качества. В [15] предложен новый алгоритм на основе восприятия речи POLQA, который разработан взамен более простого PESQ и обеспечивает более точную оценку искажений РС. Другой перспективный алгоритм оценки качества речи на основе модели восприятия ViSQOL рассмотрен в [16]. В [17] приведен обзор инструментальных моделей для оценки качества речи на основе перцепционных и когнитивных характеристик слуховой системы человека. В [18] также рассмотрены методы и критерии психоакустической оценки качества речи в сетях связи на основе алгоритмов методы PESQ, POLQA, E-model и другие. Показана возможность применения данных алгоритмов для вычисления разборчивости речи на выходе современных сетей связи. В [19] проведено сравнение алгоритмов PESQ и POLQA и показаны преимущества последнего алгоритма в современных сетях связи.

Наиболее простые из них оценивают изменение одного из параметров РС в частотной или временной областях. Более сложные производят исследование качества речи и осуществляют комплексный анализ искажений РС и его отдельных характеристик в виде [4-10, 13, 14]:

– показатель отношения сигнал-шум [4, 5, 13]:

$$\text{ОСШ} = 10 \lg \frac{\sum_{n=1}^{N_d} x^2(n)}{\sum_{n=1}^{N_d} (x(n) - y(n))^2}, \quad (1)$$

где $x(n)$ и $y(n)$ — n -е отсчеты исходного и декодированного РС, N_d — количество отсчетов дискретного РС;

– показатель сегментного отношения сигнал-шум ($\text{ОСШ}_{\text{сег}}$) [5, 13]:

$$\text{ОСШ}_{\text{сег}} = \frac{10}{M} \sum_{m=1}^M \lg \sum_{n=1}^{N_{\text{seg}}} \left(\frac{x^2(n, m)}{(x(n, m) - y(n, m))^2} \right), \quad (2)$$

где $x(n, m)$ и $y(n, m)$ — n -е отсчеты на m -м сегменте исходного и декодированного РС, N_{seg} — количество отсчетов в сегменте РС, M — число сегментов РС;

– показатель расстояния Итакура-Саито (Itakura-Saito Distance — ISD) [5, 6, 9]:

$$\text{ISD} = \frac{1}{N_d} \sum_{n=1}^{N_d} \left(\frac{|X(f_n)|}{|Y(f_n)|} - \log \frac{|X(f_n)|}{|Y(f_n)|} - 1 \right), \quad (3)$$

где $X(f_n)$ и $Y(f_n)$ — спектры исходного РС и декодированного РС;

– показатель искажения спектра барков (Bark Spectral Distortion — BSD) [5, 10]:

$$\text{BSD} = \sum_{g=1}^G \sum_{n=1}^{N_{b,g}} (|X(f_n, g)| - |Y(f_n, g)|)^2, \quad (4)$$

где $X(f_n, g)$ и $Y(f_n, g)$ — g -ая критическая полоса спектров исходного и декодированного РС, $N_{b,g}$ — количество отсчетов в g -ой критической полосе, G — общее количество критических полос, для сигнала в полосе частот 300 — 3400 Гц $G=18$;

– показатель модифицированной оценки искажения спектра барков (Modified Bark Spectral Distortion — MBSD) [8-9]

$$\text{MBSD} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \left[P \sum_{g=1}^G \sum_{n=1}^{N_{b,g}} |X(f_n, m, g) - Y(f_n, m, g)|^2 \right], \quad (5)$$

где $X(f_n, m, g)$ и $Y(f_n, m, g)$ — g -ая критическая полоса спектров m -го сегмента исходного и декодированного РС, P — мера восприятия искажений (в случае, когда искажения ощутимы $P=1$, в других случаях $P=0$);

– показатель расстояния COSH (COSH Distance) [5, 11]

$$\text{COSH} = \frac{1}{N_d} \sum_{n=1}^{N_d} \left[\frac{1}{2} \left(\frac{|Y(f_n)|}{|X(f_n)|} + \frac{|X(f_n)|}{|Y(f_n)|} - 1 \right) \right]; \quad (6)$$

– показатель искажения фазового спектра (Spectral Phase Distortion – SP) [5, 10]:

$$\text{SP} = \frac{1}{N_d} \sum_{n=1}^{N_d} (\theta_x(f_n) - \theta_y(f_n))^2, \quad (7)$$

где $\theta_x(f_n)$ и $\theta_y(f_n)$ — фазовые спектры исходного и декодированного РС, N_d — количество отсчетов дискретного РС;

– показатель корреляции возбуждения спектра (Excitation Spectral Correlation — ESC) [5, 12]:

$$ESC = \frac{\left(\sum_{n=1}^{N_d} |X(f_n)| \cdot |Y(f_n)| \right)^2}{\sum_{n=1}^{N_d} |X(f_n)|^2 \sum_{n=1}^{N_d} |Y(f_n)|^2}; \quad (8)$$

– показатель искажения спектра (Spectral Distortion — SD) [5, 10]:

$$SD = \frac{10}{N_d} \sum_{n=1}^{N_d} \left[\log_{10} |X(f_n)| - \log_{10} |Y(f_n)| \right]. \quad (9)$$

Также для оценки качества речи может использоваться фонетическая функция [20], предложенная А.А. Пироговым. Физический смысл фонетической функции заключается в оценке изменения спектральной динамики речи.

Согласно [21], фонемы отличаются друг от друга, прежде всего, изменениями спектрального распределения. Фонетическая функция (функция ощущения спектральной динамики — FOSD) имеет вид [20, 21]:

$$\begin{aligned} P_H(\omega, t) &= P_2(\omega, t) - P_1(\omega, t) = \\ &= \int_0^{\infty} \exp\left(\frac{-\tau}{T}\right) \cdot \lg\left(\frac{S_2(\omega, t)}{S_2(\omega, t-\tau)}\right) d\tau - \int_0^{\infty} \exp\left(\frac{-\tau}{T}\right) \cdot \lg\left(\frac{S_1(\omega, t)}{S_1(\omega, t-\tau)}\right) d\tau, \end{aligned} \quad (10)$$

где $S_1(\omega, t)$ — мгновенный спектр исходного РС, $S_2(\omega, t)$ — мгновенный спектр декодированного РС, $P_2(\omega, t) - P_1(\omega, t)$ — разность FOSD декодированного и исходного РС, T — длина анализируемого кадра РС, τ — временной сдвиг РС.

3. Функциональная схема проведения экспериментальных исследований алгоритмов объективной оценки качества речи приведена на рисунке 1.

На рисунке 1 используются следующие обозначения: М — микрофон, ПФ — полосовой фильтр, ПК — программный конвертор, К — ключ, БФП — блок формирования помехи, БУ —

блок управления, КС — канал связи, БООК — блок объективной оценки качества речи, ОО, СО — объективная и субъективная оценки качества речи соответственно.

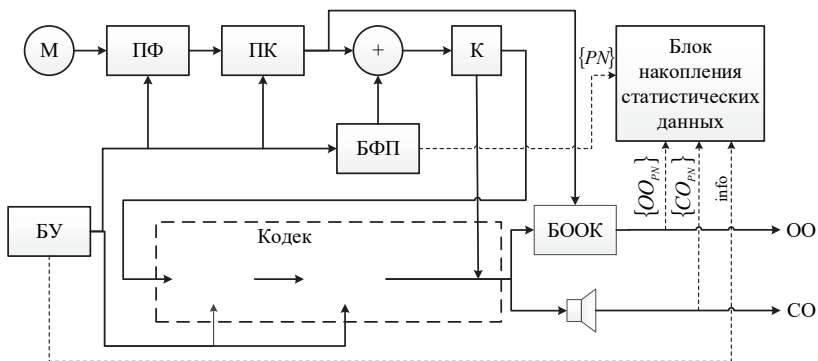


Рис.1. Функциональная схема проведения экспериментальных исследований

Регистрируемый микрофоном М тестовый РС с частотой дискретизации 44,1 кГц и разрядностью квантования 16 бит поступает на ПФ с полосой пропускания 0,3-3,4 кГц и далее преобразуется программным конвертором ПК с частотой дискретизации 8 кГц или 16 кГц согласно требованиям кодера. Блок БФП осуществляет формирование АП с учетом характеристик микрофона и ПФ с определенным уровнем, чтобы обеспечить требуемое ОСШ (-10, 0, 10, 20, 30 дБ). Выбранная в блоке БУ АП из блока БФП суммируется с РС с выхода ПК, и полученная аддитивная смесь РС и АП поступают на вход блока Кодер. При ОСШ равном 30 дБ АП мало заметны на слух и их влиянием можно пренебречь.

В блоках Кодер и Декодер происходит кодирование и декодирование РС. Декодированный РС поступает на динамик, где осуществляется СО качества речи по критериям разборчивости речи и узнаваемости голоса, а также на вход блока объективной оценки качества речи БООК, где осуществляется ОО качества речи по предложенным выше показателям. Блок БУ осуществляет выбор режимов работы таких управляемых блоков, как ПФ, ПК, БФП, Кодер и Декодер.

Ключ К имеет два режима работы: при его размыкании на вход блока БООК и динамик подается исходный РС с АП, а при его замыкании смесь РС с АП подается на вход кодера. Это позволяет отдельно оценивать искажения РС, обусловленные АП, и искажениями в кодеке, а также их совместное влияние.

В Блоке накопления статистических данных осуществляется запись и хранение условий и результатов эксперимента: параметров

помехи из БФП — PN, информацию о выбранной паре Кодер и Декодер — info, объективную оценку из БООК — OO_{PN} , а также субъективные оценки экспертов — CO_{PN} .

Для проверки эффективности алгоритмов объективной оценки качества был собран массив PC — около 40 различных записей для каждого из 40 дикторов, полученных согласно ГОСТ Р 50840-95 [1], так и фрагментов спонтанной речи.

Запись PC осуществлялась в специальном помещении кабинетного типа (с размерами 5,7*2,9*3 м и временем реверберации порядка 350 мс) при наличии естественного фонового шума слабого уровня. Для записи использовался профессиональный диктофон Olympus LS-10 (Linear PCM recorder), обеспечивающий возможность записи PC в формате WAV со следующими параметрами: частота дискретизации — 44,1 кГц; разрядность квантования — 16 бит; тип кодирования — импульсно-кодовая модуляция (ИКМ). Диктофон был установлен на расстоянии 0,5 м перед диктором на уровне лица. Общее количество незашумленных записанных фраз составило 1600.

В связке блоков Кодер-Декодер (рисунки 1) использовались 24 вида кодеков (LBRAMR, MMBE, G723.1, ICELP, G729a, G728i, AMR, GSM, G726, Vorbis OGG, MPEG 1.2.8) со скоростями передачи 1...64 кбит/с.

Проводились исследования оценки качества речи при отсутствии блока Кодек, то есть при воздействии АП на PC на входе микрофона.

В дальнейшем аналогичные исследования проводились при подаче PC и АП на вход кодека.

АП по-разному влияют на характеристики первичных кодеков, поэтому важна совместная оценка влияния АП и искажений, возникающих в кодеках источника на качество речи.

Исходя из [3] и других источников [22-24] целесообразно проводить анализ качества речи для следующих четырех классов АП, которые формировались в БФП в пределах частот 0,3–3,4 кГц:

- широкополосная стационарная, в качестве которой использовался белый гауссовский шум (БГШ);
- низкочастотная стационарная в виде БГШ на выходе фильтра низких частот, амплитудно-частотная характеристика которого имеет частоту среза 2 кГц и наклон 9 дБ/октаву в сторону высоких частот;
- низкочастотная нестационарная, представляющая собой нарезку реализаций шума транспортного потока;
- широкополосная нестационарная в виде записи музыки.

Восстановленный PC поступает на акустические колонки наряду с незашумленным PC с выхода ПФ, который служил в качестве образца, и в соответствии с ГОСТ Р 50840-95 производилась оценка

качества восстановленной на выходе декодера речи в баллах по пятибальной шкале десятью аудиторами.

Данные исследования были проведены для всех исследуемых кодеков, для десяти фраз, рекомендованных ГОСТ Р 50840-95 и тридцати фрагментов спонтанной речи, сорока дикторов при действии каждого вида АП с различными уровнями ОСШ (30, 20, 10, 0, -10 дБ), после чего было проведено усреднение по всем дикторам и аудиторам. Полученные зависимости субъективного качества речи К от ОСШ сравнивались с аналогичными зависимостями объективных оценок качества полученных в БООК и сохраненных в Блоке накопления статических данных.

4. Исследования корреляции объективной и субъективной оценки качества речи. В качестве меры эффективности объективного алгоритма использовалась степень корреляции между полученными объективными и субъективной оценкой качества речи, согласно выражению [11]:

$$R_{corr} = \frac{\left(\sum_{k=1}^K (X_1(k) - \overline{X_1})(X_2(k) - \overline{X_2}) \right)}{\sqrt{\sum_{k=1}^K (X_1(k) - \overline{X_1})^2 \sum_{k=1}^K (X_2(k) - \overline{X_2})^2}}, \quad (11)$$

где $X_1(k)$, $X_2(k)$ — k -ые значения массивов объективных и субъективных оценок качества речи, $\overline{X_1}$, $\overline{X_2}$ — средние значения массивов объективных и субъективных оценок качества речи, k — номер массива реализаций.

В таблице 1 приведены усредненные значения корреляций объективных и субъективных оценок качества речи (темным цветом в таблице выделены максимальные коэффициенты корреляции для различных алгоритмов оценки качества речи и кодеков) при действии различных видов АП в диапазоне отношений сигнал–шум от 30 до -10 дБ для кодеков ММВЕ при скорости передачи 1,2 кбит/с, ICELP при скорости передачи 4,8 кбит/с, G723.1 со скоростью передачи 5,3 кбит/с, G729а со скоростью передачи 8 кбит/с. Аналогичные исследования проведены для других вышеперечисленных кодеков РС как при наличии АП, так и при их отсутствии.

Как видно, из анализа полученных данных, наибольший коэффициент корреляции обеспечивают показатели оценки ESC и FOSD.

Таблица 1. Коэффициенты корреляции показателей объективной и субъективной оценки качества речи

Алгоритмы \ Кодеки	MMBE	ICELP	G723.1	G729a
Скорость, кбит/с	1,2	4,8	5,3	8
СКО	0,7	0,97	0,97	0,90
ОСШsegm	0,72	0,96	0,98	0,96
ESC	0,82	0,99	0,89	0,89
SD	0,67	0,98	0,97	0,97
SP	0,26	0,07	0,57	0,29
ISD	0,62	0,94	0,71	0,21
COSH	0,56	0,92	0,6	0,15
BSD	0,89	0,91	0,81	0,85
MBSD	0,90	0,96	0,93	0,96
FOSD	0,93	0,88	0,84	0,95

Из алгоритмов оценки качества речи во временной области, которые применяются главным образом для кодеков формы со скоростью передачи РС 32...64 кбит/с наибольший коэффициент корреляции с субъективной оценкой обеспечивал показатель оценки качества на основе отношения сигнал-шум сегментное (signal-to-noise ratio, сокр. ОСШ). Для других методов кодирования сильнее коррелированы результаты объективных оценок при использовании более сложных алгоритмов.

5. Модификация показателя ESC. Среди методов объективной оценки качества речи для алгоритмов осуществляющих обработку в частотной области выделяется показатель корреляции возбуждения спектра ESC. Рассмотрим возможную модификацию данного показателя в целях более точного его соответствия субъективным оценкам РС.

В случае наличия исходного и декодированного РС предложен показатель MESC [22, 23], осуществляющий вычисление оценки качества речи в пределах критических полос спектра с учетом коэффициентов их значимости:

$$MESC = \frac{1}{G} \sum_{g=1}^G \left(\frac{\left(\sum_{n=1}^{N_{b,g}} \beta_g |X(f_n, g)| \cdot |Y(f_n, g)| \right)^2}{\left(\sum_{n=1}^{N_{b,g}} \beta_g |X(f_n, g)|^2 \sum_{n=1}^{N_{b,g}} \beta_g |Y(f_n, g)|^2 \right)} \right), \quad (12)$$

где β_g — коэффициент «значимости» спектральных составляющих g -ой критической полосы, $X(f_n, g)$ и $Y(f_n, g)$ — g -ая критическая

полоса спектров исходного и декодированного РС, $N_{b,g}$ — количество отсчетов в g -ой критической полосе, G — общее количество критических полос.

Другая возможная модификация показателя ESC при отсутствии исходного РС имеет вид:

$$MESC2 = \frac{1}{G} \sum_{g=1}^G \left(\frac{\left(\sum_{n=1}^{N_{b,g}} \beta_g |X_0(f_n, g)| \cdot |Y(f_n, g)| \right)^2}{\left(\sum_{n=1}^{N_{b,g}} \beta_g |X_0(f_n, g)|^2 \sum_{n=1}^{N_{b,g}} \beta_g |Y(f_n, g)|^2 \right)} \right), \quad (13)$$

где $X_0(f_n)$ — модель усредненного спектра РС.

Согласно [5, 6], усредненный спектр РС определяется в соответствии со следующим выражением:

$$X_0(f_n) = 4\sigma^2 \cdot (f_n/f_0) / \left[1 + (f_n/f_0)^2 \right]^2, \quad (14)$$

где σ^2 — дисперсия выборок РС, f_n — n -ая спектральная составляющая РС в пределах от 0,1 до 8,0 кГц, f_0 — частота основного тона речи, равна 400 Гц.

Коэффициенты «значимости» критической полосы β_g , выделенной согласно рекомендациям [25], оценивались как отношение энергии РС, сосредоточенной в критической полосе E_g к энергии E_{X_0} усредненного спектра РС (14), в виде:

$$\beta_g = \{E_g / E_{X_0}\}. \quad (15)$$

В соответствии с выражением (15), для каждой g -ой из критических полос, которые определялись в соответствии с [25], были получены следующие коэффициенты «значимости» β_g (таблица 2).

Таблица 2. Коэффициенты значимости критических полос

g	β_g	g	β_g	g	β_g
1	0,0049	7	0,0890	13	0,0409
2	0,0371	8	0,0775	14	0,0355
3	0,0685	9	0,0653	15	0,0317
4	0,0837	10	0,0611	16	0,0282
5	0,0926	11	0,0521	17	0,0254
6	0,0908	12	0,0455	18	0,0235

При экспериментальных исследованиях [22, 23] было показано, что показатель MESC обеспечивает коэффициент корреляции для кодека ММВЕ — 0,9, для кодека ICELP — 0,99, для кодека G723.1 — 0,98 и для кодека G729a — 0,96.

Таким образом, предложенная модификация показателя ESC увеличивает значения коэффициента корреляции в среднем на 0,08 при действии всех рассмотренных видов АП.

6. Модификация показателя FOSD. В случае наличия исходного и декодированного РС предложен показатель MFOSD (модификация показателя оценки FOSD (10)), осуществляющий вычисление изменения спектральной динамики критических полос спектров соседних сегментов РС по формуле:

$$\begin{aligned}
 MFOSD &= \sum_{m=2}^M \sum_{g=1}^G \beta_g \sum_{n=1}^{N_{b,g}} P_2(f_n, g, N_{seg} m) = \\
 &= \sum_{m=2}^M \sum_{g=1}^G \beta_g \sum_{n=1}^{N_{b,g}} \left(\frac{|Y(f_n, g, N_{seg} m)|}{|Y(f_n, g, N_{seg} (m-1))|} - \frac{|X(f_n, g, N_{seg} m)|}{|X(f_n, g, N_{seg} (m-1))|} \right), \quad (16)
 \end{aligned}$$

где M — количество сегментов РС, $P_2(f_n, g, m)$ — показатель FOSD для g -ой критической полосы спектра сегмента m с длиной N_{seg} , β_g — коэффициент «значимости» спектральных составляющих g -ой критической полосы, $X(f_n, g, m)$ и $Y(f_n, g, m)$ — g -ая критическая полоса спектра сегмента m с длиной N_{seg} исходного и декодированного РС. При экспериментальных исследованиях показано, что при отсутствии исходного РС остается возможным определение разборчивости речи, при этом модернизация показателя FOSD имеет вид:

$$\begin{aligned}
 MFOSD &= \sum_{m=2}^M \sum_{g=1}^G \beta_g \sum_{n=1}^{N_{b,g}} P_2(f_n, g, N_{seg} m) = \\
 &= \sum_{m=2}^M \sum_{g=1}^G \beta_g \sum_{n=1}^{N_{b,g}} \frac{|Y(f_n, g, N_{seg} m)|}{|Y(f_n, g, N_{seg} (m-1))|}. \quad (17)
 \end{aligned}$$

Показано, что при экспериментальных исследованиях [22, 23] показатель MFOSD обеспечивает коэффициент корреляции для кодека ММВЕ — 0,95, для кодека ICELP — 0,89, для кодека G723.1 — 0,88 и для кодека G729a — 0,97.

Таким образом, предложенная модификация показателя FOSD увеличивает значение коэффициента корреляции в среднем на 0,03 при действии всех рассмотренных видов АП.

7. Формирование кривых регрессии. Немаловажным элементом получения оценки качества речи является приведение шкалы объективной оценки полученных данных к шкале субъективной оценки, более удобной для восприятия человеком.

Для этих целей формируется так называемая «кривая регрессии» — массив коэффициентов полинома для преобразования шкалы [22]. На рисунке 2 показана схема получения коэффициентов кривой регрессии на этапе накопления статистических данных.

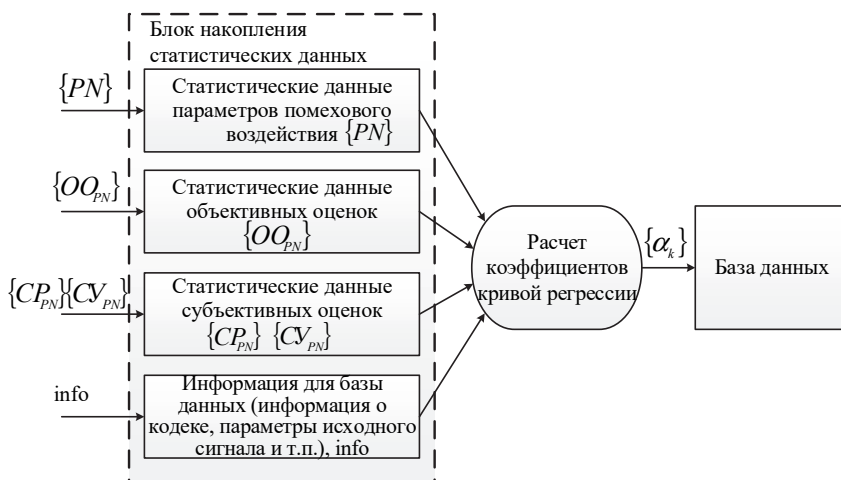


Рис. 2. Схема получения коэффициентов кривой регрессии на этапе накопления статистических данных

Исходными статистическими данными в пределах исследования одного кодека являются:

- массив информации о значении переменного параметра помехового воздействия $\{PN\}$, из блока БФП (рисунок 2);
- массив объективной оценки $\{OO_{PN}\}$, соответствующий массиву $\{PN\}$, из блока БООК (рисунок 2);
- массивы субъективных оценки разборчивости речи $\{CP_{PN}\}$ соответствующие массиву $\{PN\}$, при проведении субъективного оценивания качества речи (рисунок 2);
- информация для учета в базе данных info, из блока БУ (рисунок 2).

Преобразование шкалы задается в виде полинома:

$$CO' = \sum_{k=1}^K \alpha_k \cdot OO^{k-1}, \quad (18)$$

где α_k — k -ый коэффициент кривой регрессии, OO — значение объективной оценки качества речи, K — порядок кривой регрессии. Набор коэффициентов α_k передается для хранения в базу данных с меткой `info` для учета конкретных параметров исследования (наименование и параметры кодека, параметры РС и т.п.).

Объективная оценка, полученная с блока БООК и массив коэффициентов $\{\alpha_k\}$ с блока базы данных, позволяют преобразовать объективную оценку качества речи к шкале субъективной оценки (рисунок 3).

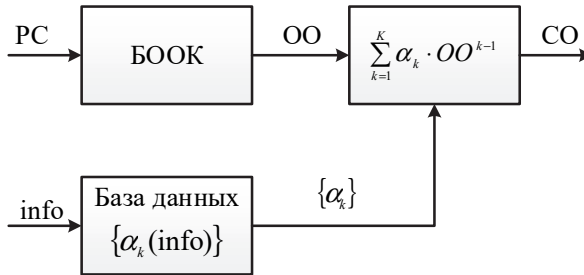


Рис. 3. Преобразование объективной оценки качества речи к шкале субъективной оценки

8. Комплексный алгоритм оценки качества речи на выходе кодеков РС. Для оценки качества речи на выходе различных кодеков источника, как при отсутствии, так и при наличии только АП, были выбраны показатели, обеспечивающие наиболее достоверную оценку в частотной и временной областях, а также в области изменения спектральной динамики: показателя MESC, который обеспечивает равномерно высокую корреляцию среди всех алгоритмов оценки в частотной области; отношение сигнал-шум сегментное, обеспечивающее высокую точность для основных кодеков формы, и модификация показателя FOSD (MFOSD) — в области спектральной динамики [22].

В качестве критерия для выбора конкретных показателей являлись близость полученных объективных оценок к субъективной, возможность оценки сигнала во временной и спектральной области, а

также в области спектральной динамики. Кроме того, учитывалась простота реализации представленных методов.

Оценка качества речи проводилась на основе трех показателей с учетом воздействия на каждый из них АП:

$$k = \alpha k_1 SNR_{seg} + \beta k_2 MESC + \gamma k_3 MFOSD, \quad (19)$$

где k_1, k_2, k_3 — нормировочные коэффициенты. Коэффициенты k_1, k_2, k_3 необходимы для нормировок вклада методов объективной оценки, так как эти оценки имеют различный порядок и изначально несопоставимы, α, β, γ — коэффициенты, с помощью которых осуществляется учет различного вклада каждого из показателей оценки качества речи SNR_{seg} , MESC и MFOSD при действии различных АП, для которых выполняется условие $\alpha + \beta + \gamma = 1$. Структурная схема предложенного алгоритма изображена на рисунке 4.

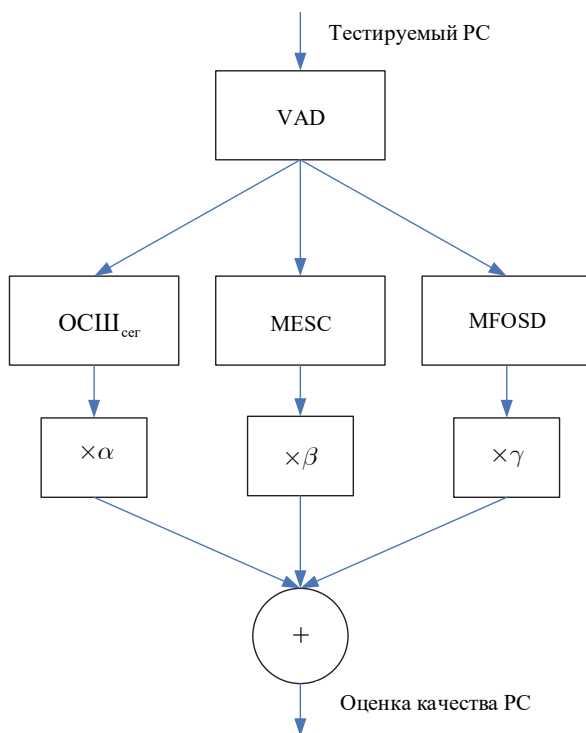


Рис. 4. Структурная схема комплексного алгоритма объективной оценки качества речи

Согласно показной на структурной схеме комплексного алгоритма объективной оценки качества речи, тестируемый сигнал сначала подается на схему VAD, в которой производится отброс пауз РС, для оценки только содержательной части сообщения. Затем РС без пауз подается параллельно на три схемы оценки — где происходит оценка качества речи по каждому из показателей SNR_{seg} , MESCC и MFOSD. Затем вклады этих методов в общую оценку суммируются с учетом их коэффициентов α, β, γ . Набор коэффициентов определяется для каждого вида АП.

9. Результаты экспериментальных исследований комплексного алгоритма оценки качества речи при действии АП. В соответствии с приведенной на рисунке 4 структурной схемой комплексного алгоритма объективной оценки качества речи проведен ряд экспериментальных исследований.

Осуществлен выбор значений коэффициентов α, β, γ (с шагом 0,1) при которых коэффициент корреляции между объективной оценкой предложенного комплексного алгоритма и субъективной оценкой качества речи достигал максимальных значений. При широкополосной квазистационарной помехе значения коэффициентов должны быть $\alpha = \beta = 0,2, \gamma = 0,6$; при широкополосной нестационарной помехе — $\alpha = 0,1, \beta = 0,9, \gamma = 0,1$; при низкочастотной квазистационарной помехе — $\alpha = 0,1, \beta = \gamma = 0,45$; при низкочастотной нестационарной помехе — $\alpha = 0,25, \beta = 0,5, \gamma = 0,25$. Также можно определить коэффициенты α, β, γ для каждого показателя кодирования РС.

При использовании комплексного алгоритма объективной оценки качества речи для декодированного РС при действии АП достаточно определить тип действующей помехи и вид кодера РС, чтобы получить необходимые значения коэффициентов α, β, γ .

На основе полученных коэффициентов при условии что известен тип действующей АП, возможно оценить объективное качество РС и сравнить его с субъективными оценками, полученными согласно ГОСТ Р 50840-95 [1].

Разница Δ между субъективной и объективной оценкой, полученной с помощью комплексного алгоритма оценки качества речи, приведенная к пятибальной шкале оценки и усредненная для всех видов АП и кодеков РС в зависимости от отношения сигнал-шум ОСШ показана на рисунке 5.

Как видно из приведенной зависимости ошибка оценки качества речи согласно ГОСТ Р50840-95 не превышает 0,35 балла при отношении сигнал-шум от 30 дБ до -10 дБ.

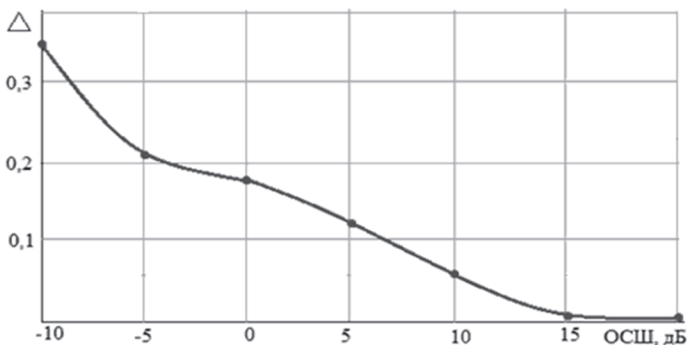


Рис. 5. Зависимость разницы между субъективной и объективной оценкой качества речи полученной с помощью комплексного алгоритма от отношения сигнал-шум

Экспериментальные исследования воздействия АП на качество речи проводились при отсутствии и наличии блока КОДЕК (рисунок 1). При отсутствии блока КОДЕК влияние АП сказывалось больше во временной и частотной областях, поэтому наибольший вес имели показатели SNR_{seg} и MESC. Полученные оценки качества речи на выходе кодеков РС в зависимости от отношения сигнал-шум показаны в работе [22].

Аналогичные исследования проводились при наличии блока КОДЕК. Результаты проведенных исследований показали:

- возможность использования комплексного алгоритма объективной оценки качества по формуле (19). Показано, что ошибка оценки качества речи согласно ГОСТ Р50840-95 не превышает 0,35 балла при отношении сигнал-шум от 30 дБ до -10 дБ,

- возможность адаптации предложенного комплексного алгоритма объективной оценки качества к известным видам АП и алгоритмам первичного кодирования РС. Показано, что при выборе коэффициентов, соответствующих определенному виду АП или виду первичного кодирования ошибка снижается более чем на 20%;

- уменьшение ошибки оценки качества речи при воздействии АП в случае отсутствия кодека РС до 50%;

- наименьшие искажения в тракт передачи вносят кодеки формы на основе ИКМ и АДИКМ со скоростью передачи не менее 32 кбит/с, а также кодеки на основе алгоритма CELP;

- наибольшие искажения в тракт передачи вносят низкоскоростные кодеки LBRAMR, ММВЕ при скоростях передачи 2 кбит/с и ниже;

- наиболее чувствительными к действию АП являются кодеки LBRAMR, ММВЕ со скоростями передачи ниже 2,4 кбит/с;

– наименее чувствительные к действию АП кодеки на основе алгоритма CELP и высокоскоростные кодеки формы.

10. Заключение. Рассматриваются методы объективной оценки качества речи, основанные на измерении динамических и статических характеристик РС на выходе кодека источника. Обоснована функциональная схема проведения экспериментальных исследований. Приведены результаты анализа корреляции объективной и субъективной оценки качества речи. Предложены модификации показателя корреляции возбуждения спектра MESC и модификация показателя функции ощущения спектральной динамики MFOSD. Предложен алгоритм формирования кривых регрессии, позволяющий выполнить преобразование объективной оценки к шкале субъективной оценки качества речи.

На основании использования наиболее точных методов оценки качества речи восстановленных РС предложен комплексный алгоритм объективной аппаратурной оценки качества речи согласно ГОСТ Р 50840-95 при воздействии на микрофон широкополосных и низкочастотных стационарных и нестационарных АП. Показано, что применение комплексного алгоритма позволяет получить объективную оценку качества речи согласно ГОСТ Р 50840-95 со средней ошибкой не более 0,35 балла при отношениях сигнал-шум от 30 дБ до -10 дБ как при отсутствии так и при наличии кодека РС.

Литература

1. ГОСТ Р 50840-95. Передача речи по трактам связи // М.: Госстандарт России. 1995. 202 с.
2. ГОСТ Р 51061-97 «Системы низкоскоростной передачи речи по цифровым каналам // М.: Госстандарт России. 1997. 24 с.
3. *Кропотов Ю.А., Ермолаев В.А.* Моделирование и методы исследований акустических сигналов, шумов и помех в системах телекоммуникаций: монография // М. Берлин: Директ-Медиа. 2016. 251 с.
4. *Цыбулин М.К., Бочаров М.О.* Анализ методов оценки качества передачи речевой информации по каналам связи различной структуры // Электросвязь. 2008. №11. С. 46–48.
5. *Шелухин О.И., Лукьянцев Н.Ф.* Цифровая обработка и передача речи / под ред. О.И. Шелухина // М.: Радио и связь. 2000. 456 с.
6. *Афанасьев А.А., Ильюшин М.В.* Использование психоакустической модели слуха при разработке вокодеров с линейным предсказанием // Цифровая обработка сигналов. 2011. № 1. С. 49–52.
7. *Мурадова А. А.* Методы оценки качества передачи речевых пакетов при исследовании надежности сети NGN // Молодой ученый. 2013. № 10. С. 162–168.
8. *Павловец А.Н., Петровский А.А.* Использование закономерностей психоакустики в процедуре квантования параметров гармонической модели речевого сигнала // Речевые технологии. 2008. № 4. С. 55–60.
9. *Yang W.* Enhanced Modified Bark Spectral Distortion (EMBSD): An Objective Speech Quality Measure Based On Audible Distortion And Cognition Model // Temple University. 1999. 164 p.
10. *Ozer H., Avciabas I., Sankur B., Memon N.* Steganalysis of audio based on audio quality metrics, in: SPIE Electronic Imaging Conf. on Security and Watermarking of Multimedia Contents // Proceedings of SPIE. 2003. vol. 5020. pp. 55–66.

11. *Liu W.M. et al.* Assessment of objective quality measures for speech intelligibility estimation // 2006 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP 2006). 2006. vol. 1. pp. 699–702.
12. *Соломенник А.И. и др.* Оценка качества синтезированной речи: проблемы и решения // Изв. Вузов. Приборостроение. 2013. Т. 56. № 2. С. 38–42.
13. *Столбов М.Б.* Алгоритм оценки отношения сигнал/шум речевых сигналов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики, оптики. 2012. № 6(82). С. 67–72.
14. *Lee M.-K., Kang H.-G.,* Speech quality estimation of voice over internet protocol codec using a packet loss impairment model // J. Acoust. Soc. Am. 2013. vol. 134(5). pp. 438–444.
15. *Beerends J.G. et al.* Perceptual objective listening quality assessment (POLQA), the third generation ITU-T standard for end-to-end speech quality measurement part I—Temporal alignment // Journal of the Audio Engineering Society. 2013. vol. 61(6). pp. 366–384.
16. *Hines A. et al.* Robustness of speech quality metrics to background noise and network degradations: Comparing ViSQOL, PESQ and POLQA // 2013 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). 2013. pp. 3697–3701.
17. *Möller S, Heusdens R,* Objective estimation of speech quality for communication systems // Proc. of the IEEE. 2013. vol. 101(9). pp. 1955–1967.
18. *Терехов А.Н., Рысин Ю.С.* Алгоритм определения факторов, влияющих на качество восприятия телефонных услуг связи // Электросвязь. 2016. № 3. С. 65–68.
19. *Poča P., Melvin H., Hines A.* An analysis of the impact of playout delay adjustments introduced by voip jitter buffers on listening speech quality // Acta Acustica united with Acustica. 2015. no. 101(3). pp. 616–631.
20. *Пирогов А.А.* Вокодерная телефония // М.: Связь. 1974. 536 с.
21. *Соболев В.Н.* Информационные технологии в синтетической акустике // М.: ИРИАС. 2007. 360 с.
22. *Кириллов С.Н., Ромашкин Ю.Н., Картавенко Я.О., Дмитриев В.Т.* Аналитическая оценка качества речи на выходе систем низкоскоростного кодирования при воздействии акустических помех // Речевые технологии. 2012. № 4. С. 16–23.
23. *Кириллов С.Н., Дмитриев В.Т., Картавенко Я.О.* Алгоритм объективной оценки качества декодированного речевого сигнала на основе изменения спектральной динамики критических полос спектра // Вестник РГРТУ. 2011. № 3(37). С. 3–7.
24. *Илюшин М.В., Дмитриев В.Т., Басов О.О., Тарусов В.А.* Качество передачи речи и его оценка: учебное пособие /под общ. ред. С. Н. Кириллова // Орел: Академия ФСО России. 2015. 104 с.
25. *Цешкер Э., Фельдкеллер Р.* Ухо как приемник информации: 2-е изд., перераб. и доп. // М.: Связь. 1971. 255 с.

Кириллов Сергей Николаевич — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой радиоуправления и связи факультета радиотехники и телекоммуникаций, ФГБОУ ВО "Рязанский государственный радиотехнический университет" (РГРТУ). Область научных интересов: теория многокритериального синтеза сложных дискретных сигналов и устройств их обработки при действии мешающих факторов, обработка речевых сигналов. Число научных публикаций — 650. kirillov.rsreu@gmail.com; ул. Гагарина, 59/1, 390005, Рязань; р.т.: +7(4912)46-03-62, Факс: +7(4912)92-22-15.

Дмитриев Владимир Тимурович — к-т техн. наук, доцент, доцент кафедры радиоуправления и связи факультета радиотехники и телекоммуникаций, ФГБОУ ВО "Рязанский государственный радиотехнический университет" (РГРТУ). Область научных интересов: методы и алгоритмы обработки речевых сигналов, адаптивные системы обработки. Число научных публикаций — 200. vol77@rambler.ru; ул. Гагарина, 59/1, 390005, Рязань; р.т.: +7(4912)46-03-62, Факс: +7(4912)92-22-15.

Поддержка исследований. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (№16-47-620544\16) и Правительства Рязанской области.

S.N. KIRILLOV, V.T. DMITRIEV
**A COMPLEX ALGORITHM FOR OBJECTIVE EVALUATION OF
 THE DECODED SPEECH SIGNAL QUALITY UNDER THE
 ACTION OF ACOUSTIC INTERFERENCE**

Kirillov S.N., Dmitriev V.T. A Complex Algorithm for Objective Evaluation of the Decoded Speech Signal Quality Under the Action of Acoustic Interference.

Abstract. The paper presents algorithms for objective evaluation of speech quality are considered, based on the measurement of dynamic and static characteristics of speech signals at the source codec output. The functional scheme of carrying out of experimental researches is proved. The results of the analysis of the correlation of objective and subjective evaluation of speech quality are given. Modifications of the objective quality assessment are proposed on the basis of the correlation of the excitation of the MESC spectrum and modification of the exponent on the basis of the calculation of the sensation function of the spectral dynamics of MFOSD. The algorithm of regression curve formation is proposed, which allows to perform the transformation of objective evaluation to the scale of subjective evaluation of speech quality.

Based on the use of the most accurate modifications of the speech quality assessment indicators for reconstructed speech signals, a complex algorithm for objective hardware evaluation of the speech quality is proposed when the broadband and low-frequency stationary and nonstationary acoustic waves are applied to the microphone. It is shown that the use of a complex algorithm makes it possible to obtain an objective evaluation of the quality of speech according to GOST R 50840-95 with an average error of no more than 0.35 points for signal-to-noise ratios of 30 dB to -10 dB.

Keywords: speech quality estimation, low-speed coding, communication channel, acoustic interference.

Kirillov Sergey Nikolaevich — Ph.D., Dr. Sci., professor, head of department of radio control and communication department of radio engineering and telecommunications faculty, Ryazan State Radioengineering University. Research interests: theory of multi-criterial synthesis of complex discrete signals and devices for their processing under the influence of interfering factors; processing of speech signals. The number of publications — 650. kirillov.rsreu@gmail.com; 59/1, Gagarina street, 390005, Rjazan', Russia; office phone: +7(4912)46-03-62, Fax: +7(4912)92-22-15.

Dmitriev Vladimir Timurovich — Ph.D., associate professor, associate professor of radio control and communication department of radio engineering and telecommunications faculty, Ryazan State Radioengineering University. Research interests: methods and algorithms for processing speech signals, adaptive processing systems. The number of publications — 200. vol77@rambler.ru; 59/1, Gagarina street, 390005, Rjazan', Russia; office phone: +7(4912)46-03-62, Fax: +7(4912)92-22-15.

Acknowledgement. This research is supported by RFBR (grant 16-47-620544 \ 16) and the Government of the Ryazan Region.

References

1. GOST R 50840-95. Peredacha rechi po traktam svyazi [State Standard R 50840-95. Transmission of speech through communication paths]. M.: Gosstandart Rossii, 1995. 202 p. (In Russ.).

2. GOST R 51061-97 Sistemy nizkoskorostnoy peredachi rechi po tsifrovym kanalam [State Standard R 51061-97. Systems for low-speed speech transmission over digital channels']. M.: Gosstandart Rossii. 1997. 24 p. (In Russ.).
3. Kropotov Yu.A., Ermolaev V.A. *Modelirovaniye i metody issledovaniy akusticheskih signalov, shumov i pomekh v sistemakh telekommunikatsiy: monografiya* [Modeling and methods for studying acoustic signals, noise and interference in telecommunication systems: monograph]. M.: Berlin: Direct Media, 2016. 251 p. (In Russ.).
4. Tsybulin M.K., Bocharov M.O. [Analysis of methods for assessing the quality of voice information transmission through communication channels of different structures]. *Elektrosvyaz' – Telecommunications*. 2008. no. 11. pp. 46-48. (In Russ.).
5. Shelukhin O.I., Lukyantsev N.F. *Tsifrovaya obrabotka i peredacha rechi. Pod. red. O.I. Shelukhina* [Digital processing and voice transmission. Edited by O.I. Shelukhin]. M.: Radio and Communication. 2000. 456 p. (In Russ.).
6. Afanasyev AA, Ilyushin MV [Use of the psychoacoustic hearing model in the development of vocoders with linear prediction]. *Tsifrovaya obrabotka signalov. – Digital signal processing*. 2011. vol. 1. pp. 49–52.
7. Muradova A.A. [Methods for assessing the quality of voice packets transmission when investigating the reliability of the NGN network]. *Molodoy ucheniy – Young Scientist*. 2013. vol. 10. pp. 162–168. (In Russ.).
8. Pavlovets A.N., Petrovsky A.A. [Use of patterns of psychoacoustics in the procedure for quantizing the parameters of a harmonic model of a speech signal]. *Rechevyye tekhnologii – Speech technologies*. 2008. vol. 4. pp. 55–60. (In Russ.).
9. Yang W. Enhanced Modified Bark Spectral Distortion (EMBSD): An Objective Speech Quality Measure Based On Audible Distortion And Cognition Model. Temple University. 1999. 164 p.
10. Ozer H., Avcibas I., Sankur B., Memon N. Steganalysis of audio based on audio quality metrics, in: SPIE Electronic Imaging Conf. on Security and Watermarking of Multimedia Contents. Proceedings of SPIE. 2003. vol. 5020. pp. 55–66.
11. Liu W.M. et al. Assessment of objective quality measures for speech intelligibility estimation. 2006 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). 2006. vol. 1. pp. 699–702.
12. Solomennik A.I. et al. Evaluation of the quality of synthesized speech: problems and solutions. *Izv. High schools. Priborostroenie – Journal of Instrument Engineering* 2013. vol. 56. no. 2. pp. 38–42 (In Russ.).
13. Stolbov M. [Algorithm for estimating the signal-to-noise ratio of speech signals]. *Nauchno-tekhnicheskiy vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki, optiki – Scientific-technical bulletin of information technologies, mechanics, optics*. 2012. vol. 6(82). pp. 67–72. (In Russ.).
14. Lee M.-K., Kang H.-G., Speech quality estimation of voice over internet protocol codec using a packet loss impairment model. *J. Acoust. Soc. Am*. 2013. vol. 134(5). pp. 438–444.
15. Beerends J.G. et al. Perceptual objective listening quality assessment (POLQA), the third generation ITU-T standard for end-to-end speech quality measurement part I—Temporal alignment. *Journal of the Audio Engineering Society*. 2013. vol. 61(6). pp. 366–384.
16. Hines A. et al. Robustness of speech quality metrics to background noise and network degradations: Comparing ViSQOL, PESQ and POLQA. 2013 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). 2013. pp. 3697–3701.
17. Möller S, Heusdens R, Objective estimation of speech quality for communication systems. Proc. of the IEEE. 2013. vol. 101(9). pp. 1955–1967.
18. Terekhov A.N., Rysin Yu.S. [Algorithm for determining factors affecting the quality of perception of telephone communication services]. *Elektrosvyaz' – Telecommunications*. 2016. vol. 3. pp. 65–68. (In Russ.).

19. Počta P., Melvin H., Hines A. An analysis of the impact of playout delay adjustments introduced by voip jitter buffers on listening speech quality. *Acta Acustica united with Acustica*. 2015. no. 101(3). pp. 616–631.
20. Pirogov A.A. *Vokodernaya telefoniya* [Vocoderal telephony]. Moscow: Communications. 1974. 536 p. (In Russ.).
21. Sobolev V.N. *Informatsionnyye tekhnologii v sinteticheskoy akustike* [Information technology in synthetic acoustics]. Moscow: IRI-AS. 2007. 360 p. (In Russ.).
22. Romashkin Yu.N., Kirillov S.N., Kartavenko Ya.O., Dmitriev V.T. [Analytical evaluation of speech quality at the output of low-speed coding systems under the influence of acoustic noise]. *Rechevyye tekhnologii – Speech technologies* 2012. vol. 4. pp. 16–23. (In Russ.).
23. Kirillov S.N., Dmitriev V.T., Kartavenko Ya. [Algorithm of objective evaluation of the quality of the decoded speech signal on the basis of a change in the spectral dynamics of critical bands of the spectrum]. *Vestnik RGRU – Bulletin of the RGRU*. 2011. vol. 3(37). pp. 3–7. (In Russ.).
24. Ilyushin M.V., Dmitriev V.T., Basov O.O., Tarusov V.A. *Kachestvo peredachi rechi i yego otsenka: uchebnoe posobie*. Pod red. S N. Kirillova [Speech quality and its evaluation: tutorial. Edited by S.N. Kirillov]. Orel: Academy of the FSO of Russia, 2015. 104 p. (In Russ.).
25. Zwicker E., Feldtkeller R. *Das Ohr als Nachrichtenempfänger*. Hirzel-Verlag. 1967. 232 p. (Russ. ed.: Zwicker E., Feldkeller R. *Ear as a receiver of information*. 2 nd ed., rev. and add. Moscow: Communications. 1971. 255 p.).

H. SAMANI
**MULTIMODAL COGNITIVE PROCESSING USING ARTIFICIAL
ENDOCRINE SYSTEM FOR DEVELOPMENT OF AFFECTIVE
VIRTUAL AGENTS**

Samani H. Multimodal Cognitive Processing Using Artificial Endocrine System for Development of Affective Virtual Agents.

Abstract. In this paper a comprehensive architecture for emotional and affective process in a virtual agent is presented. By fusing video, audio and text emotion of the users as affective sources to the system, the virtual agent can appraise the mood of clients. To emulate the influence of the human hormones in the virtual agent, the proposed system employs Artificial Endocrine System (AES) in the aspects of moods and biological needs, by controlling the concentration level of the influential hormones. The agent affective processor engages AES, personality and mood modules to manage the internal state. Intelligent virtual agent would interact with clients according to its affective state circumstances.

The proposed system presents a complete platform to capture emotional channels through the network to analyze and process them in an affective engine in order to determine the emotional quality of the response.

Keywords: Multimodal, Emotional Agent, Cognitive Robotics, Affective Computing, Artificial Endocrine System.

1. Introduction. Intelligent Virtual Agents are human-like embodied characters [3]. These autonomous artificial characters have applications in many fields, such as computer game [58], customer relationship management [61], human-machine interface [62], virtual pets [63] and chatterbot [4]. In order to achieve an effective emulation, virtual agents must display realistic behavior [51]. With great behavioral responsiveness, the user will have a sensation of interacting with an agent [48,51]. The virtual agent with strong artificial intelligence should possess sapience and reasoning abilities [5]. For instance, in [49] the virtual agent who displays sense of humor and has learning ability to respond has presented. Some models have the ability to display emotions while interacting with users [52]. They can also be equipped with modules like voice recognition and language learning abilities [60]. In other words, virtual agents should respond to human interaction in real-time and with suitable behavior, probably with emotions rather than predetermined, highly contextual and behaviorally subtle [53].

In the proposed system, the online virtual agent operates in a network to capture messages of the clients by utilizing the web camera, microphone and keyboard as sensors. Our aim is that the virtual agent gives human-like responses to the clients. That goal is achievable if the virtual agent has internal

affective state which resembles to the mood of the human being. In daily life, our responses not only depend on the interaction with one specific conversational and emotional channel, but also rely on the overall mood at that time. Hence, we employ the concept of the internal affective state for the virtual agent to emulate the emotional states of humans.

The internal state of the virtual agent changes according to interactions with all of the users and its responses are based on its overall mood instead of direct responses which merely depend on the corresponding client. We consider both emotional and biological related hormones in order to develop the realtime structure that provides the emotional weight of the response for the overall decision making module of the virtual agent by developing the Artificial Endocrine System.

In Section 2 we described the structure of the Sentimental Architecture in details according to several layers in Figure 1. We presented an overview of the experimental development of that platform to demonstrate the practical functionality of the proposed architecture in Section 3. The paper is concluded in Section 4.

2. System Architecture. We propose a Sentimental Architecture as the multi-layer and multi-module platform for the emotional processing of the virtual agent in this paper. The overall schematic of this platform is presented in Figure 1.

Each of the next sections of this paper corresponds with one layer in the system architecture in Figure 1 to provide the detailed description regarding the functionality of that layer. System layers include: input, perception, data fusion, AI and output.

2.1. Input Layer. While clients chat with the virtual agent over network, the input layer captures data from three different sources of video, audio and text of all the interacting users and transmits that channel information to the perception layer. The technical details of this layer depend on the structure of the network. We have considered the centralized and parallel network in our architecture.

2.2. Perception Layer. The role of the perception layer is to pre-process, filter and classify the emotional data from input layer. This layer computes the emotional value of the clients through $n \times 3 \times 6$ channels, where n is number of the clients over the network; Video (V), Audio (A) and Text(T) are 3 sources of data acquisition; and Happy (H), Sad (S), Surprise(U), Disgust(D), Anger (A) and Fear (F) are 6 basic emotions.

2.2.1. Visual Module. Facial expression is the excellent source for identifying the emotional state of the human being. The visual module of the

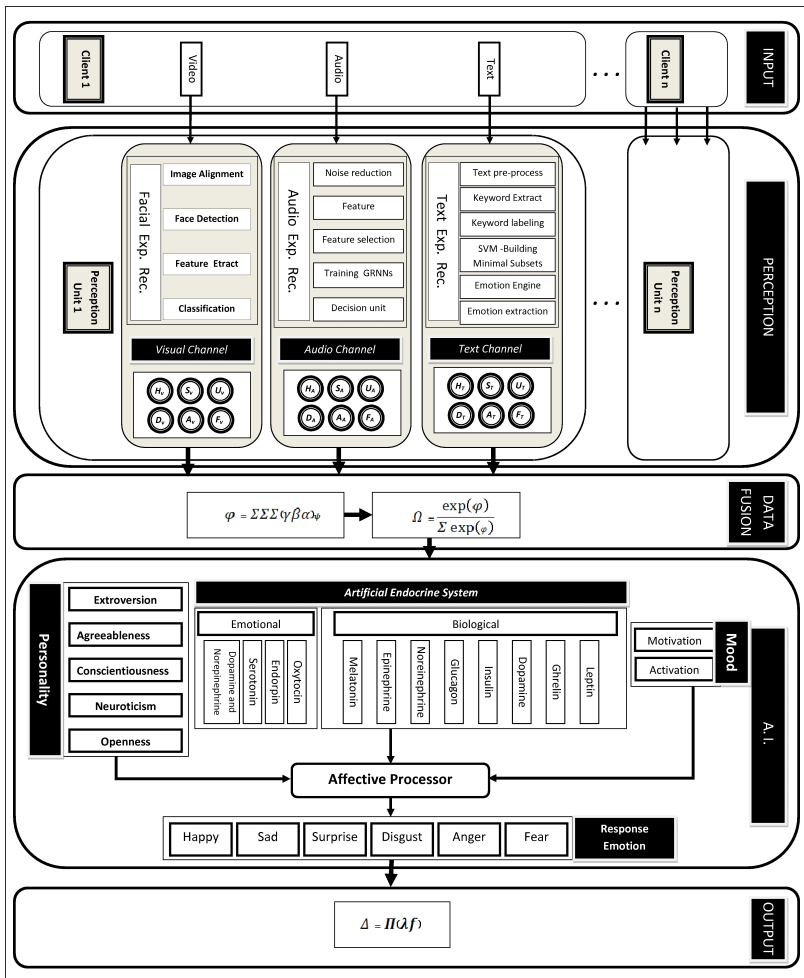


Fig. 1. Sentimental Multi-Layer Architecture

system analyzes the facial expressions of the user to recognize the emotion of the user based on the video information which is provided by the web camera.

Proper utilization of dynamic facial motion information can be invaluable and critical to the process of emotion recognition and interpretation [14]. Several facial expression recognition techniques are available nowadays [8-11].

By the use of neural network it is possible to develop the Multi Layer Perceptron (MLP) system which Primary, hidden and output layers of MLP correspond to the sensory data, facial action units and the classification layers respectively. The output of such MLP can classify facial expressions into 6 basic emotions: Happiness, Sadness, Disgust, Surprise, Anger, and Fear. Details of such model are presented in other related research [2].

2.2.2. Audio Module. The process of the vocal aspect in the communication has inherent complexity in virtual agent. Firstly, in this field we are interested in daily conversational type and contains short informal utterances. Secondly, we need an emotion recognizer which is able to handle voices of various people. The system should be speaker-independent and capable of handling different voices. Furthermore, speech emotion recognition in such situations is out of reach for current systems.

The existing work used data mining and machine learning methods such as neural networks, Support Vector Machines or decision trees and they use a wide variety of voice features (mean, max, min, max-min, variance, of the pitch and intensity distribution, length of phonemic or syllabic segments or pitch rising segments) to meet these goals [31, 33-35]. They achieved good results in their experiments. However, their systems are speaker-dependent which is not desired for the virtual agents.

For our proposed system, we used an approach to do the recognition of human emotion in speech speaker-dependently. To achieve this aim, the input audio is pre-processed to remove the noise from the audio. Briefly speaking, we remove the leading and the trailing edge to clear the input. The volume is also normalized to make the recognition procedure optimal. Unvoiced sounds are cut and the result of this step will be passed to the next level to extract the features from the audio. We extract the potential features from each utterance. The discriminatory power of these features is then analyzed using GRNN [30] and K-nearest Neighbors classifier [28].

The GRNN is a memory based neural network based on the estimation of a probability density function. The main advantage of such system over the conventional multilayer feed-forward neural network is that unlike the multilayer feed-forward neural network which requires a large number of iterations in training to converge to a desired solution, GRNN needs only a single pass of learning to achieve optimal performance in classification [30]. In mathematical

terms, if we have a vector random variable x , a scalar random variable y , let X be a particular measured value of x , then the conditional mean of y given X can be represented as:

$$\hat{Y}_{(x)} = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i \exp\left(-\frac{D_i^2}{2\sigma^2}\right)}{\sum_{i=1}^n \exp\left(-\frac{D_i^2}{2\sigma^2}\right)}, \quad (1)$$

where D_i is defined as:

$$D_i^2 = (X - X_i)^T (X - X_i). \quad (2)$$

In the above equations, n denotes the number of samples. X_i and Y_i are the sample values of the random variable x and y .

After choosing the best features, these selected features are used to train the main neural network which contains six sub-neural networks, one for each of the emotions. The outputs of the six sub-neural networks will be passed to the decision unit to make the final emotion. An overview of this system can be shown in the Audio module of Perception module in the Figure 1.

2.2.3. Text Module. Generally, there are two main approaches for emotion extraction from the text, keyword spotting and statistical classification [17]. The first one is the most popular and naive method for the emotion recognition [18]. In this approach, text is processed using search engine which places tags and intensity of the emotional words. It is considered a straightforward way of classifying words into six emotional categories. This method has two main problems: Firstly, sometimes emotions are hidden in the concept of the sentence and not just the words. Secondly, this technique fails to tag grammatically complex negations, ironic dialogs or slang. The second approach is the statistical classification that can reflect the useful features in addition to previous emotional keywords [19]. There are different ways of feature extraction in this method, based on the machine learning methods, such as support vector machines [22] and conditional learning. For example in [21] the authors used conditional probability as the salient function to automatically learn and extract the keywords. In [19] Salton theory has been employed to automatically recognize the emotion from the text [27]. In this work, we used support vector machine since the training of the system is simple and has no extra complexity based on local minimas. Furthermore, using SVM makes the system clearly dependent on the most informative features of the input [23]. Our text-emotion extraction system has two main modules, the training modules which processes the training text to extract the keywords. These keywords are labeled and used to make the attributes minimal subsets using SVM. Our extraction engine is

actually made of these attribute sets. The other module is the test module which we use in real time to extract the emotions. Basically, when a new input is fed to this module, the keywords are extracted and labeled using the same procedure in training phase. After this step, we can use the extraction engine to get the emotions [24, 25].

2.3. Data Fusion Layer. The total emotional input to the system at any time is the combination of three perceptual modules of video, audio and text from all the clients. The data fusion module integrates the value of the emotional channels over the perception layer in order to supply the union emotional array to the artificial intelligence layer.

The fused emotional input value can be defined to mix three emotional inputs of six basic emotions for all the clients as equation (3):

$$\varphi_{(m_i,t)} = \left(\sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^3 \sum_{i=1}^6 \gamma_{(k)} \beta_{(jk)} \alpha_{(ijk)} \right) \Psi_{(m_i,t)}, \quad (3)$$

where $i = Happiness, Sadness, Disgust, Surprise, Anger \text{ and } Fear$ presents six basic emotions,

$j = Vision, Audio \text{ and } Text$ refers to three different source of emotional input,

n is number of clients who interact with agent at time t ,

k is the counter for number of clients,

$\alpha_{(ijk)}$ is the emotional coefficient for the i th emotion, through j th source in the k th client channel,

$\beta_{(jk)}$ is the source coefficient for j th source through k th client channel,

$\gamma_{(k)}$ is the channel coefficient for k th client channel,

$\Psi_{(m_i,t)}$ is the emotional parameter for six basic emotions at time t and

$\varphi_{(m_i,t)}$ is the fused emotional value for six basic emotions at time t which includes 6 values of emotional input from all the clients at the current time by considering 3 different weights of α , β and γ for emotion, source and channel respectively.

The Softmax activation function is used for the input emotional values in the network to be interpretable as posterior values for six different emotional categories. In this way results lie between zero and one and the sum of them would be one:

$$\Omega_i = \frac{\exp(\varphi_{(m_i,t)})}{\sum_{i=1}^6 \exp(\varphi_{(m_i,t)})}, \quad (4)$$

where Ω_i represents the normalized value of input emotions.

2.4. Artificial Intelligence (AI) Layer. The Artificial Intelligence (AI) layer processes the internal state of the virtual agent by considering the multiple emotional values of the clients and internal affective parameters to change the characteristic parameters of the virtual agent accordingly. This layer consists of several modules: Personality including five main character dimensions, Mood module as long lasting affect of the agent, AES which manages biological and emotional hormones and the Affect Processor module which computes mentioned modules to generate the values for Response Emotion module.

2.4.1. Artificial Endocrine System (AES). Natural endocrine system is viewed as a network of glands that works with nervous system to secrete hormones directly into the blood so as to control the activity of internal organs and coordinate the long range response to external stimuli [37]. Hormones which are chemicals released by components of the endocrine system affect other parts of the body. Hormones play a significant role in the endocrine system so as to preserve homeostasis. Here, we will introduce the relation of hormone with human emotion and behavior and implement the idea into our virtual agent.

Virtual biological systems considered as research field of biological inspired computing. Artificial Neural Network (ANN) is one of the well known tools in computational intelligence techniques. In the same way, The endocrine system could be also very useful tool, but there was not any interest in that apart from some basic systems like [42, 43]. Timmis and Neal [42] first proposed an artificial endocrine system (AES) in the module of a broader conceptual framework which incorporates artificial neural networks (ANN) and artificial immune systems (AIS). Later Vargas et al. [43] proposed an artificial homeostatic system based on the previous work. It focuses on mimicking the some important mechanisms in endocrine system, such as hormone mechanism. The system they proposed includes three modules which are hormone level which is to record level of hormones, hormone production controller serves to control the generation of hormones according to the variation of the internal states and external stimulus. and endocrine glands means to generate the required amount of hormones after receiving the input from the controller. Any change in the internal and external will trigger the activities in ANN and AES [38].

This paper focuses on the hormones which are related to emotions and biological qualities.

For emotion-related hormones, we consider four hormones namely Dopamine, Serotonin, Endorphin and Oxytocin, The level of these hormones is related to the emotional situation of the human being as it is presented in Table 1.

Table 1. Emotional Hormones

Hormone	Affected Emotion	Effects	Virtual function
Dopamine	Excitement, Alertness	High dopamine makes people more talkative and alert.	More Energetic and Talkative
Serotonin	Happiness, Depression, Anxiety, Fear, Apathy, Feeling of worthlessness, Fatigue, tension	High Serotonin helps maintain happiness, relieve depression, anxiety and tension.	Happier and more Confident
Endorpin	Contentment	Pain Killer	Improves the Sense of Well-Being
Oxytocin	Trust, Empathy, Generosity, Love	High oxytocin increases trust and reduces fear. It affects generosity by increasing empathy during perspective taking.	Trust the other party and show empathy over others.

Increasing level of Norepinephrine with Dopamine make people more focused, more talkative and alert. Increasing amount of Serontonin and norepinephrine are used as anti-depressants to relieve depression. Low Serotonin level may lead to depression, anxiety, fear, feeling of worthlessness, fatigue, insomnia. Endorphin which resemble the opiates are known to produce analgesia and a sense of well-being. Oxytocin are the hormone of love. Its role is to maintain healthy interpersonal relationships, high level of Oxytocin increases trust and relieves interpersonal stress. In our artificial endocrine system, we intend to implant the above hormones into our virtual agent so that their affective states and behaviour will be affected by the variation in the hormone levels [40, 41].

Furthermore, the affective state and behavior of the virtual agent should be affected by the physiological parameters, such as blood pressure, blood glucose and heart rate. These parameters are influenced by hormones as well. Hence, we introduce a group of hormones which are closely related to the physiological parameters of humans: Melatonin, Epinephrine, Orexin, Norepinephrine, Glucagon, Insulin, Ghrelin and Leptin.

Melatonin cause drowsiness. Epinephrine increase rate of heart beat and raises blood glucose . Both Dopamine and Noreinephrine increase blood pressure. Glucagon raise blood glucose level and Insulin is known as decreasing blood glucose level. Ghrelin stimulates apeptite, but Leptin decreases apeptite.

Table 2. Biological Hormones

Hormone	Effects/Action	Virtual
Melatonin	Drowsiness ↑	Drowsy, Sleepy
Norepinephrine	Blood pressure ↑	Excited, Active
Epinephrine	Heart Beat Rate ↑ Blood Glucose ↑	Sick
Glucagon	Blood Glucose ↑	Full, Lethargy
Insulin	Blood Glucose ↓	Hungry, Dizzy
Orexin	Heart Beat Rate ↑ Appetite ↑	stimulated, Motivated
Ghrelin	Appetite ↑	Hungry, Dizzy
Leptin	Appetite ↓	Lazy, Listless

The effect of these 8 biological hormones are explained in more details in Table 2.

In our artificial endocrine system, we intend to implant the above hormones into our virtual agent so that their affective states and behavior would be affected by variation of hormone levels [55].

Such a system is able to generate the respective amount of hormones based on the current hormone concentration level which represents the current emotional state and the clients emotional input as external stimulus.

Based on the current internal states of virtual agent and external stimulations, the virtual agent will signal the glands to generate the required amount of hormones. Hence, the virtual agent will experience change in the emotional state and biological need.

In our system all hormones are considered to be secreted by two parameters:

- The activation function which can be presented by employing the logistic function;
- The gland bustle that should be considered through all the stimuli channels.

So the glands secretion can be modeled as equation 5:

$$\Lambda_q = \frac{1}{1 + \exp(-aq)} \sum_{q=1}^{18 \times n} \rho_i \Theta_q. \quad (5)$$

Above representing shows that the gland secretion, Λ , is the product of the each gland bustle, Θ_q , by considering ρ_q as the stimuli weight, which can be activated through the nonlinear activation function $\frac{1}{1 + \exp(-aq)}$. The gland bustle should be considered over 6 emotional values of 3 different sources, (18), for all the n clients. The coefficient a in the activation function depends on the current volume of the hormone in the system.

Furthermore, The ratio of secreted amount of each hormone is the friction of that hormone to total hormone volume which can be calculated according to the gland activity. Equation 6 shows that, δ_q , which is the hormone ratio for each of 12 hormones is calculated by considering hormone rate as produced over time t , by assuming coefficient ζ for each hormone flow rate.

$$\delta_q = \frac{\zeta_q \left[\frac{1}{1 + \exp(-aq)} (\sum_{q=1}^{18 \times n} \rho_i \Theta_q) \right] t}{\sum_{q=1}^{12} \zeta_q \left[\frac{1}{1 + \exp(-ab)} (\sum_{q=1}^{18 \times n} \rho_i \Theta_q) \right] t} \quad (6)$$

In this way, the virtual agent is equipped with basic emotional hormones to control affective situation like being happy, talkative and energetic; also it will have basic biological needs like feeling hungry, sleepy, full and sick. That capability makes it possible to see dynamic and realistic behavior from the agent.

2.4.2. Mood. The mood refers to more long term emotional state. Psychologist have considered two fundamental dimensions for the mood. The circumplex model of the affect is considered with two dimensions of valence and arousal [44]. In the another model the mood is a product of two dimensions, energy and the tension [45].

Following that fundamental concept, in our model, we also considered mood has two main dimensions including activation and motivation. Activation is related to the amount of energy in the mood. For instance, excitement can be considered as high level of activation, The activation level with surprise is higher than happiness. Motivation refers to pleasure and displeasure of a mood. For example, joy represents high motivation in our model, but sad means low motivation.

2.4.3. Personality. Personality is set of characteristics that makes a person distinct from another. The basic five dimensions of human personality are extroversion, agreeableness, conscientiousness, neuroticism and openness [47].

In our model, we adopt the above five big personality dimensions to equip our virtual agents with unique personalities. Extroversion describes the attributes as sociability, talkativeness with high level of emotional expressiveness. Agreeableness includes characteristics like trust, affection and kindness. Conscientiousness describes people with good impulse control and great thoughtfulness. People with high Neuroticism tend to experience anxiety, emotional instability. Lastly, people with high openness are likely to have a broad spectrum of interests and very imaginative, creative. The above mentioned five personality parameters will create the personality module of the virtual agent in the proposed model.

2.5. Output Layer. The affective processor of the system which computes the affective state of the agent decides on the emotional output value of the agent for all the clients. This layer determines the total output of the system based on the value of the AI modules. Equation 7 presents the output generation structure:

$$\Delta_E = \prod_{i=1}^4 \lambda_i f_i. \quad (7)$$

Δ_E represents the emotional output weight, where f and λ represent the function and corresponding emotional output weight for four decision making modules consist of Emotional input, Mood, Personality and Endocrine system.

3. Experimental Result. According to the described architecture we developed the proof of concept virtual agent in TCP/IP network that interacts with 5 users simultaneously. Clients could interact with the virtual agent in this network whilst administrator control the internal state of the server. Figure 2 shows the sample of the experiment in the Sentimental layout for one client.

To evaluate the performance of the Sentimental Architecture we asked 20 users to participate in interaction experiment with the developed online virtual agent. We put them in four groups of five participants, two with emotional system and two without it, to compare their engagement level according to the duration of conversation in the interaction test. The average interaction time for two groups with the Sentimental Architecture was %35 more than the duration of conversation for two groups using the system without that platform, which shows the significance of emotional processing in the virtual agent.

We also conducted a survey including a questionnaire and interview with each of the clients after using the system. We asked participants to rate the system performance. Participants who used the system with Sentimental Architecture reported %23 more engagement with the system compare to those who used the system without such architecture.

We also asked participants to report if they felt emotions in responses from the virtual agent by rating between 0 for no emotion and 10 for maximum emotion. The Mean Score for the sentimental system was %28 more than a system without that capability. Furthermore, Users expressed that they felt more realistic behaviors during interaction with the agent which is equipped with the Sentimental architecture.

The network included 90 emotional channels for (5 clients) \times (3 sources) \times (6 emotions). According to this experiment even by using almost equal emotional input coefficients to the system and considering similar affective state, clients receive different emotional responses from the agent. That tallies with the fact that even though the human can interact with few different people

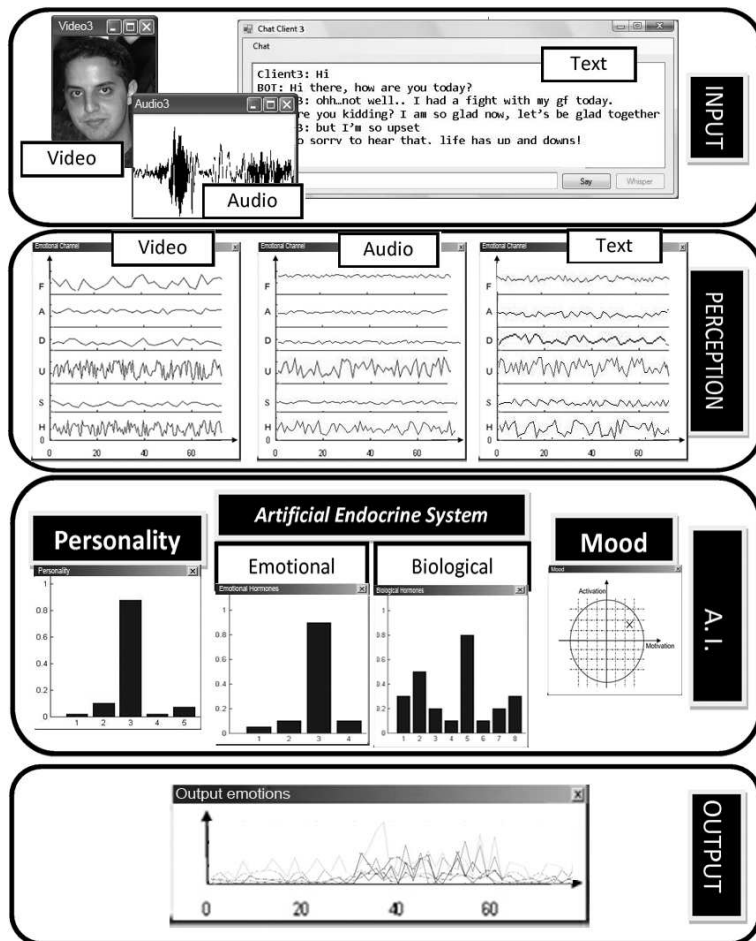


Fig. 2. Experimental result in the form of the proposed Architecture

at the same time, we are able to response with variant emotional values, even having the same mood [1].

4. Conclusions. We presented a multimodal sentimental system for virtual agent base on the Artificial Endocrine System in order to improve the affective properties of the agent. We also employed mood and personality in order to reinforce the emotional capability of the agent. The proposed system is capable of interacting with several users simultaneously, however the agent's behaviors depends on the instantaneous affective properties of the agent. Such ability aims to grant realistic behaviors by the agent compare to other systems which behave merely according to the interactive parameters. We tested such system with several participants and user studies show that the proposed sentimental architecture presents an efficient emotional system for interaction with users. The main idea is that current virtual agent can be equipped with emotional units and the artificial intelligent module of virtual agents can add emotional intelligence as well. This system can be applied to various types of virtual agents such as chatbots, virtual avatars and robots.

References

1. Samani H. The evaluation of affection in human-robot interaction. *Kybernetes*. 2016. vol. 45. pp. 1257–1272.
2. Samani H.A., Elham S. A multidisciplinary artificial intelligence model of an affective robot. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2012. vol. 9. pp. 1–11.
3. Sam T., Silvervarg A., Gulz A., Tom Z. Physical vs. Virtual Agent Embodiment and Effects on Social Interaction. International Conference on Intelligent Virtual Agents. 2016. pp. 412–415.
4. Benton M. et al. Quality in Chatbots and Intelligent Conversational Agents. *Software Quality Professional Magazine*. 2017. vol. 19(3).
5. Samani H. Cognitive robotics. CRC Press, 2015. 215 p.
6. Ivan M. Some Related Article I Wrote. *Some Fine Journal*. 1999. vol. 99. pp. 1–100.
7. Andreas N. A Book He Wrote. Erewhon : His Publisher, 1999.
8. Liu P., Han S., Meng Z. Tong Y. Facial expression recognition via a boosted deep belief network. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2014. pp. 1805–1812.
9. Happy S. L., Aurobinda R. Automatic facial expression recognition using features of salient facial patches. *IEEE transactions on Affective Computing*. IEEE, 2015, vol. 6. pp. 1–12.
10. Evangelos S., Hatice G., Andrea C. Automatic analysis of facial affect: A survey of registration, representation, and recognition. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*. IEEE, 2015 . vol. 37. pp. 1113–1133.
11. Ge S., Samani H., Ong Y., Hang C. Active affective facial analysis for human-robot interaction. The 17th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication(RO-MAN 2008). 2008. pp. 83–88.
12. Abboud B., Davoine F., Dang M. Facial expression recognition and synthesis based on an appearance model. *Signal Processing: Image Communication*. Elsevier, 2004. vol. 19. pp. 723–740.

13. Cohen I., Sebe N., Garg A., Chen L.S., Huang T.S. Facial expression recognition from video sequences: temporal and static modeling. *Computer Vision and Image Understanding*. Elsevier, 2003. vol. 91. pp. 160–187.
14. Krumhuber E., Kappas A., Manstead A. Effects of dynamic aspects of facial expressions: a review. *Emotion Review*. 2013. vol. 5. pp. 41–46.
15. Bartlett M., Littlewort G., Fasel I., Movellan J. Real Time Face Detection and Facial Expression Recognition: Development and Applications to Human Computer Interaction. CVPR Workshop on Computer Vision and Pattern Recognition for Human-Computer Interaction. 2003. vol. 5. pp. 52–53.
16. Fasel B., Luetttin J. Automatic facial expression analysis: a survey. *Pattern Recognition*. Elsevier, 2003. vol. 36. pp. 259–275.
17. Mohammad S. Sentiment analysis: Detecting valence, emotions, and other affectual states from text. *Emotion measurement*. 2015. pp. 201–238.
18. Li W., Xu H. Text-based emotion classification using emotion cause extraction. *Expert Systems with Applications*. Elsevier, 2014. vol. 41. pp. 1742–1749.
19. Lee C., Lee G. Emotion recognition for affective user interface. The 16th IEEE International Symposium on Robot and Human interactive Communication. 2007. vol. 8. pp. 798–801.
20. Zhe X., Boucouvalas A.C. Text-to-Emotion Engine for Real Time Internet Communication. Proceedings of International Symposium on Communication Systems, Networks and DSPs. 2002. pp. 164–168.
21. Lee C.M., Narayanan S.S. Toward detecting emotions in spoken dialogs. *Speech and Audio Processing*, IEEE Transactions on. 2005. vol. 13. pp. 293–303.
22. Cristianini N., Shawe-Taylor J. An Introduction to Support Vector Machines, Cambridge University Press, 2000. 204 p.
23. Povoda L. et al. Optimization Methods in Emotion Recognition System. *Radioengineering*. 2016. vol. 25. pp. 565.
24. Saadatian E. et al. Artificial Intelligence Model of an Smartphone-Based Virtual Companion. International Conference on Entertainment Computing. 2014. pp. 173–178.
25. Elham S., Samani H., Arash T., Ryohei N. Technologically mediated intimate communication: An overview and future directions. International Conference on Entertainment Computing. 2013. pp. 93–104.
26. Zhang Y., Ren F., Kuroiwa S. Semi-Automatic Emotion Recognition from Chinese Text. Proceedings of the Ninth IASTED International Conference on Intelligent Systems and Control. 2006.
27. Salton G., Yang C.S. On the Specification of Term Values in Automatic Indexing. *Journal of documentation*. 1973. vol. 29. no. 4. pp. 351–372.
28. Dasarathy B.V. Nearest neighbor (NN) norms: nn pattern classification techniques. Los Alamitos, Calif.: IEEE Computer Society Press, 1991. 550 p.
29. Bhatti M.W., Wang Y., Guan L. A neural network approach for human emotion recognition in speech. *Circuits and Systems*, 2004. ISCAS'04. Proceedings of the 2004 International Symposium on. 2004. vol. 2. pp. II–181.
30. Specht D.F. A general regression neural network. *Neural Networks*, IEEE Transactions on. 1991. vol. 2(6). pp. 568–576.
31. Dellaert F., Polzin T., Waibel A. Recognizing emotion in speech. Proceedings of the Fourth International Conference on Spoken Language (ICSLP 96). 1996. vol. 3. pp. 1970–1973.
32. Teng Z., Ren F., Kuroiwa S. Emotion Recognition from Text based on the Rough Set Theory and the Support Vector Machines. International Conference on Natural Language Processing and Knowledge Engineering (NLP-KE 2007). 2007. pp. 36–41.

33. Breazeal C.L. Designing Sociable Robots. Bradford Book, 2002. 282 p.
34. Oudeyer P.Y. The production and recognition of emotions in speech: features and algorithms. *International Journal of Human-Computer Studies*. 2003. vol. 59. pp. 157–183.
35. McGilloway S. et al. Approaching Automatic Recognition of Emotion from Voice: A Rough Benchmark. ISCA Tutorial and Research Workshop (ITRW) on Speech and Emotion. 2000. 6 p
36. Purves W.K., Orians G.H., Heller H.C. Life: The Science of Biology: 7th ed. 2003. 1121 p.
37. Straub R.H. Interaction of the endocrine system with inflammation: a function of energy and volume regulation. *Arthritis research and therapy*. 2014. vol. 16. no 1. 15 p.
38. Samani H., Saadatian E., Jalaeian B. Biologically Inspired Artificial Endocrine System for Human Computer Interaction. International Conference on Human-Computer Interaction. 2015. pp. 71–81.
39. Norman A.W., Litwack G. Hormones. Academic Press San Diego, 1997. 806 p.
40. Morrison M.F. Hormones, Gender and the Aging Brain: The Endocrine Basis of Geriatric Psychiatry. Cambridge University Press, 2000. 259 p.
41. Pfaff D.W., Phillips M.I., Rubin R.T. Principles of Hormone/Behavior Relations. Academic Press, 2004. 360 p.
42. Timmis J., Neal M. Once more Unto the Breach: Towards Artificial Homeostatis. Recent developments in Biologically inspired computing. 2005. pp. 340–365.
43. Vargas P. et al. Von Artificial Homeostatis system : A Novel approach. European Conference on Artificial Life (ECAL 2005). 2005. pp. 754–764.
44. Russell J.A. A circumplex model of affect. *Journal of Personality and Social Psychology*. 1980. vol. 39. pp. 1161–1178.
45. Thayer R.E. The Biopsychology of Mood and Arousal. Oxford University Press, USA, 1989. 234 p.
46. Barrick M.R., Mount M.K. The Big Five Personality Dimensions and Job Performance: A Meta-Analysis. *Personnel Psychology*. 1991. vol. 44. no. 1. p. 1–26.
47. Kim H.J., Shin K.H., Swanger N. Burnout and engagement: A comparative analysis using the Big Five personality dimensions. *International Journal of Hospitality Management*. 2008. vol. 28. no. 1. pp. 96–104.
48. Del B.A., Vicario E., Zingoni D. An interactive environment for the visual programming of virtual agents. Proceedings of 1994 IEEE Symposium on Visual Languages. 1994. pp. 145–152.
49. Alfonsi B. "Sassy" Chatbot Wins with Wit. *IEEE Intelligent Systems*. 2006. pp. 6–7.
50. Herrero P., de Antonio A. Modelling Intelligent Virtual Agent Skills with Human-Like Senses. Conference of Computer Science. Springer. 2004. vol. 3038. pp. 575–582.
51. Del B.A., Vicario E. Specification by-Example of Virtual Agents Behavior. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*. 1995. vol. 1. no. 4. pp. 350–360.
52. Heudin J.C. Evolutionary virtual agent. Proceedings of the IEEE/WIC/ACM International Conference on Intelligent Agent Technology. 2004. pp. 93–98.
53. Zhao R., Papangelis A., Cassell J. A dyadic computational model of rapport management for human-virtual agent interaction. International Conference on Intelligent Virtual Agents. 2014. pp. 514–527.
54. Badler N., Allbeck J., Zhao L., Byun M. Representing and Parameterizing Agent Behaviors. *Computer Animation*. 2002. pp. 133–143.
55. Samani H. Lovotics: Loving robots. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. 168 p.
56. Bloch L.R., Lemish D. Disposable Love: The Rise and Fall of a Virtual Pet. *New Media & Society*. 1999. vol. 1. no. 3. pp. 283–303.
- 70 Труды СПИИРАН. 2018. Вып. 1(56). ISSN 2078-9181 (печ.), ISSN 2078-9599 (онлайн)
www.proceedings.spiiras.nw.ru

57. Adobbati R. Gamebots: A 3D Virtual World Test-Bed For Multi-Agent Research. Proceedings of the Second International Workshop on Infrastructure for Agents, MAS, and Scalable MAS. 2001. vol. 5. 6 p.
58. Fernandez-Ares A. et. al. Its time to stop: A comparison of termination conditions in the evolution of game bots. European Conference on the Applications of Evolutionary Computation. 2015. pp. 355–368.
59. Jutla D., Craig J., Bodorik P. Enabling and measuring electronic customer relationship management readiness. System Sciences, 2001. Proceedings of the 34th Annual Hawaii International Conference on. 2001. p. 10.
60. Johnson A., Roush, T., Fulton M., Reese A. Implementing Physical Capabilities for an Existing Chatbot by Using a Repurposed Animatronic to Synchronize Motor Positioning with Speech. *International Journal of Advanced Studies in Computers, Science and Engineering*. 2017 . vol. 6. pp. 20.
61. Vieira A., Sehgal A. How Banks Can Better Serve Their Customers Through Artificial Techniques. *Digital Marketplaces Unleashed*. Springer, 2018. pp. 311–326.
62. Folstad A., Brandtzaeg Pe.B. Chatbots and the new world of HCI. *Interactions*. 2017. vol. 24. no. 4. pp. 38–42.
63. Liu Y. et. al. Chatting system, method and apparatus for virtual pet. Google Patents. 2014. US Patent 8645479.

Hooman Samani — PhD in Robotics, associate professor; director of AIART Lab (Artificial Intelligence and Robotics Technology Laboratory), associate professor, Department of Electrical Engineering, College of Electrical Engineering and Computer Science, National Taipei University, Taiwan. Research interests: Robotics, Affective Computing, Artificial Intelligence, System Engineering. The number of publications — 50. hooman@mail.ntpu.edu.tw, www.hoomansamani.com; Number 151, Daxue Road, Sanxia District, New Taipei City, 23741 Taiwan; office phone (+886) 2 - 8674 1111 ext:67736, lab phone (+886) 2 - 8674 1111 ext:66981.

Х. САМАНИ

МНОГОМОДАЛЬНАЯ КОГНИТИВНАЯ ОБРАБОТКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИСКУССТВЕННОЙ ЭНДОКРИННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ РАЗВИТИЯ АФФЕКТИВНЫХ ВИРТУАЛЬНЫХ АГЕНТОВ

Самани Х. Многомодальная когнитивная обработка с использованием искусственной эндокринной системы для развития аффективных виртуальных агентов.

Аннотация. Представлена всеобъемлющая архитектура эмоционального и аффективного процесса, происходящего в виртуальном агенте. Соединяя визуальные, аудио- и текстовые эмоции пользователей как аффективные источники в системе, виртуальный агент может оценивать настроение клиентов. С целью имитации воздействия гормонов человека в виртуальном агенте в предлагаемой системе используется искусственная эндокринная система (ИЭС) для выявления настроения и биологических потребностей посредством контроля уровня концентрации воздействующих гормонов. Аффективный процессор агента задействует модули ИЭС, параметров личности и настроения для управления внутренним состоянием. Интеллектуальный виртуальный агент взаимодействует с клиентами в соответствии со своими аффективными состояниями. Предлагаемая система представляет собой полную платформу для захвата каналов эмоций в сети с целью анализа и обработки их в аффективном движении для определения эмоциональной окраски ответа.

Ключевые слова: многомодальность, эмоциональный агент, когнитивная робототехника, эмоцио-нальные вычисления, искусственная эндокринная система.

Самани Хуман — к-т техн. наук, доцент, руководитель лаборатории искусственного интеллекта и робототехники (ИИР), доцент кафедры электротехники института электротехники и информатики, Национальный университет Тайбэя. Область научных интересов: робототехника, эмоциональные вычисления, искусственный интеллект, системная инженерия. Число научных публикаций — 50. hooman@mail.ntpu.edu.tw, www.hoomansamani.com; Даксвей роад, 151, район Санься, Синьбэй, 23741, Тайвань; р.т.: (+886)2-8674-1111.

Литература

1. *Samani H.* The evaluation of affection in human-robot interaction // *Kybernetes*. 2016. vol. 45. pp. 1257–1272.
2. *Samani H.A., Elham S.* A multidisciplinary artificial intelligence model of an affective robot // *International Journal of Advanced Robotic Systems*. SAGE Publications Sage. 2012. vol. 9. 6 p.
3. *Sam T., Silvervarg A., Gulz A., Tom Z.* Physical vs. Virtual Agent Embodiment and Effects on Social Interaction // *International Conference on Intelligent Virtual Agents*. 2016. pp. 412–415.
4. *Benton M. et al.* Quality in Chatbots and Intelligent Conversational Agents // *Software Quality Professional Magazine*. 2017. vol. 19(3).
5. *Hooman S.* Cognitive robotics // *CRC Press*. 2015. 215 p.
6. *Ivan M.* Some Related Article I Wrote // *Some Fine Journal*. 1999. vol. 99. pp. 1–100.
7. *Andreas N.* A Book He Wrote // *Erewhon : His Publisher*, 1999.

8. *Liu P., Han S., Meng Z. Tong Y.* Facial expression recognition via a boosted deep belief network // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2014. pp. 1805–1812.
9. *Happy S.L., Aurobinda R.* Automatic facial expression recognition using features of salient facial patches // IEEE transactions on Affective Computing. 2015. vol. 6. pp. 1–12.
10. *Evangelos S., Hatice G., Andrea C.* Automatic analysis of facial affect: A survey of registration, representation, and recognition // IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence. IEEE, 2015. vol. 37. pp. 1113–1133.
11. *Ge S., Samani H., Ong Y., Hang C.* Active affective facial analysis for human-robot interaction // The 17th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN 2008). 2008. pp. 83–88.
12. *Abboud B., Davoine F., Dang M.* Facial expression recognition and synthesis based on an appearance model // Signal Processing: Image Communication. Elsevier, 2004. vol. 19. pp. 723–740.
13. *Cohen I et al.* Facial expression recognition from video sequences: temporal and static modeling // Computer Vision and Image Understanding. Elsevier. 2003. vol. 91. pp. 160–187.
14. *Krumhuber E., Kappas A., Manstead A.* Effects of dynamic aspects of facial expressions: a review // Emotion Review. 2013. vol. 5. pp. 41–46.
15. *Bartlett M., Littlewort G., Fasel I., Movellan J.* Real Time Face Detection and Facial Expression Recognition: Development and Applications to Human Computer Interaction // CVPR Workshop on Computer Vision and Pattern Recognition for Human-Computer Interaction. 2003. vol. 5. pp. 52–53.
16. *Fasel B., Luetin J.* Automatic facial expression analysis: a survey // Pattern Recognition. Elsevier, 2003. vol. 36. pp. 259–275.
17. *Mohammad S.* Sentiment analysis: Detecting valence, emotions, and other affectual states from text // Emotion measurement. 2015. pp. 201–238.
18. *Li W., Xu H.* Text-based emotion classification using emotion cause extraction // Expert Systems with Applications. Elsevier, 2014 . vol. 41. pp. 1742–1749.
19. *Lee C., Lee G.* Emotion recognition for affective user interface // The 16th IEEE International Symposium on Robot and Human interactive Communication. 2007. vol. 8. pp. 798–801.
20. *Zhe X., Boucouvalas A.C.* Text-to-Emotion Engine for Real Time Internet Communication // Proceedings of International Symposium on Communication Systems, Networks and DSPs. 2002. pp. 164–168.
21. *Lee C.M., Narayanan S.S.* Toward detecting emotions in spoken dialogs // IEEE transactions on speech and audio processing. 2005. vol. 13. pp. 293–303.
22. *Cristianini N., Shawe-Taylor J.* An Introduction to Support Vector Machines, Cambridge University Press, 2000. 204 p.
23. *Povoda L. et al.* Optimization Methods in Emotion Recognition System // Radioengineering. 2016. vol. 25. pp. 565.
24. *Saadatian E. et al.* Artificial Intelligence Model of an Smartphone-Based Virtual Companion // International Conference on Entertainment Computing. 2014. pp. 173–178.
25. *Elham S., Samani H., Arash T., Ryohei N.* Technologically mediated intimate communication: An overview and future directions // International Conference on Entertainment Computing. 2013. pp. 93–104.
26. *Zhang Y., Ren F., Kuroiwa S.* Semi-Automatic Emotion Recognition from Chinese Text // Proceedings of the Ninth IASTED International Conference on Intelligent Systems and Control. 2006.

27. *Salton G., Yang C.S.* On the Specification of Term Values in Automatic Indexing // Journal of documentation. 1973. vol. 29. no. 4. pp. 351–372.
28. *Dasarathy B.V.* Nearest neighbor (NN) norms: nn pattern classification techniques // IEEE Computer Society Press, 1991. 550 p.
29. *Bhatti M.W., Wang Y., Guan L.* A neural network approach for human emotion recognition in speech // Proceedings of the 2004 International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS'04). 2004. vol. 2. pp. II–181.
30. *Specht D.F.* A general regression neural network // IEEE transactions on neural networks. 1991. vol. 2(6). pp. 568–576.
31. *Dellaert F., Polzin T., Waibel A.* Recognizing emotion in speech // Proceedings of the Fourth International Conference on Spoken Language (ICSLP 96). 1996. vol. 3. pp. 1970–1973.
32. *Teng Z., Ren F., Kuroiwa S.* Emotion Recognition from Text based on the Rough Set Theory and the Support Vector Machines // International Conference on Natural Language Processing and Knowledge Engineering (NLP-KE 2007). 2007. pp. 36–41.
33. *Breazeal C.L.* Designing Sociable Robots. Bradford Book, 2002. 282 p.
34. *Oudeyer P.Y.* The production and recognition of emotions in speech: features and algorithms // International Journal of Human-Computer Studies. 2003. vol. 59. pp. 157–183.
35. *McGilloway, S. et al.* Approaching Automatic Recognition of Emotion from Voice: A Rough Benchmark // ISCA Tutorial and Research Workshop (ITRW) on Speech and Emotion. 2000. 6 p.
36. *Purves W.K., Orians G.H., Heller H.C.* Life: The Science of Biology: 7th ed. // 2003. 1121 p.
37. *Straub R.H.* Interaction of the endocrine system with inflammation: a function of energy and volume regulation // Arthritis research therapy. Arthritis research and therapy. 2014. vol. 16. no. 1. 15 p.
38. *Samani H., Saadatian E., Jalaieian B.* Biologically Inspired Artificial Endocrine System for Human Computer Interaction // International Conference on Human-Computer Interaction. 2015. pp. 71–81.
39. *Norman A.W., Litwack G.* Hormones // Academic Press. 1997. 806 p.
40. *Morrison M.F.* Hormones, Gender and the Aging Brain: The Endocrine Basis of Geriatric Psychiatry // Cambridge University Press. 2000. 259 p.
41. *Pfaff D.W., Phillips M.I., Rubin R.T.* Principles of Hormone/Behavior Relations // Academic Press. 2004. 360 p.
42. *Timmis J., Neal M.* Once more Unto the Breach: Towards Artificial Homeostasis // Recent developments in Biologically inspired computing. 2005. pp. 340–365.
43. *Vargas P. et al.* Artificial Homeostasis system : A Novel approach // European Conference on Artificial Life (ECAL 2005). 2005. pp. 754–764.
44. *Russell J.A.* A circumplex model of affect // Journal of Personality and Social Psychology. 1980. vol. 39. pp. 1161–1178.
45. *Thayer R.E.* The Biopsychology of Mood and Arousal. Oxford University Press, USA, 1989. 234 p.
46. *Barrick M.R., Mount M.K.* The Big Five Personality Dimensions and Job Performance: A Meta-Analysis // Personnel Psychology. 1991. vol. 44. no. 1. pp. 1–26.
47. *Kim H.J., Shin K.H., Swanger N.* Burnout and engagement: A comparative analysis using the Big Five personality dimensions // International Journal of Hospitality Management. 2008. vol. 28. no. 1. pp. 96–104.

48. *Del B.A., Vicario E., Zingoni D.* An interactive environment for the visual programming of virtual agents. 1994. pp. 145–152.
49. *Alfonsi B.* "Sassy" Chatbot Wins with Wit // IEEE Intelligent Systems. 2006. pp. 6–7.
50. *Herrero P. de Antonio A.* Modelling Intelligent Virtual Agent Skills with Human-Like Senses // Conference of Computer Science. Springer, 2004. vol. 3038, pp. 575–582.
51. *Del B.A., Vicario E.* Specification by-Example of Virtual Agents Behavior // IEEE Transactions on Visualizations and Computer Graphics. 1995. vol. 1. no. 4. pp. 350–360.
52. *Heudin J.C.* Evolutionary virtual agent // Proceedings of the IEEE/WIC/ACM International Conference on Intelligent Agent Technology. 2004. pp. 93–98.
53. *Zhao R., Papangelis A., Cassell J.* A dyadic computational model of rapport management for human-virtual agent interaction // International Conference on Intelligent Virtual Agents. 2014. pp. 514–527.
54. *Badler, N., Allbeck, J., Zhao, L., Byun, M.* Representing and Parameterizing Agent Behaviors // Computer Animation. 2002. pp. 133–143.
55. *Samani H.* Lovotics: Loving robots // LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. 168 p.
56. *Bloch L.R., Lemish D.* Disposable Love: The Rise and Fall of a Virtual Pet // New Media & Society. 1999. vol. 1. no. 3. pp. 283–303.
57. *Adobbati R.* Gamebots: A 3D Virtual World Test-Bed For Multi-Agent Research // Proceedings of the Second International Workshop on Infrastructure for Agents, MAS, and Scalable MAS. 2001. vol. 5. 6 p.
58. *Fernandez-Ares A. et al.* Its time to stop: A comparison of termination conditions in the evolution of game bots // European Conference on the Applications of Evolutionary Computation. 2015. pp. 355–368.
59. *Jutla D., Craig J., Bodorik P.* Enabling and measuring electronic customer relationship management readiness // Proceedings of the 34th Annual Hawaii International Conference on. 2001. p. 10.
60. *Johnson A., Roush T., Fulton M., Reese A.* Implementing Physical Capabilities for an Existing Chatbot by Using a Repurposed Animatronic to Synchronize Motor Positioning with Speech // International Journal of Advanced Studies in Computers, Science and Engineering. International Journal of Advanced Studies in Computers, Science and Engineering, 2017. vol. 6. pp. 20.
61. *Vieira A., Sehgal A.* How Banks Can Better Serve Their Customers Through Artificial Techniques // Digital Marketplaces Unleashed. Springer, 2018. pp. 311–326.
62. *Folstad A., Brandtzaeg P.B.* Chatbots and the new world of HCI // Interactions. 2017. vol. 24. no.4. pp. 38–42.
63. *Liu, Y. et al.* Chatting system, method and apparatus for virtual pet // Google Patents, 2014. US Patent 8645479.

О.В. КОФНОВ, Е.Л. ЛЕБЕДЕВ, А.В. МИХАЙЛЕНКО
**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИФРАКЦИИ
МИЛЛИМЕТРОВЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН ДЛЯ
ВЫЯВЛЕНИЯ ВНУТРЕННИХ ДЕФЕКТОВ ИЗДЕЛИЙ,
ВЫПОЛНЕННЫХ ПО АДДИТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ**

Кофнов О.В., Лебедев Е.Л., Михайленко А.В. Компьютерное моделирование дифракции миллиметровых электромагнитных волн для выявления внутренних дефектов изделий, выполненных по аддитивной технологии.

Аннотация. В статье предлагается компьютерная модель и описание метода использования электромагнитных волн с длиной 0,1-1 мм для выявления внутренних дефектов изделий, выполненных по аддитивным технологиям. С помощью предложенной модели демонстрируется возможность бесконтактного неразрушающего контроля качества по дифракционным картинам.

В настоящее время аддитивные технологии, и в частности печать на трехмерных принтерах, используют для получения изделия материалы, многие из которых свободно пропускают терагерцовое излучение (частота $3 \cdot 10^{11}$ - $3 \cdot 10^{12}$ Гц, длина волны 0,1-1 мм). В то же время дефекты, возникающие в изделиях при аддитивном производстве, имеют размеры того же порядка (0,1-1 мм), что и терагерцовые волны. Следовательно, при облучении изделий с такими дефектами монохромным миллиметровым излучением будет возникать дифракция Френеля.

Это позволяет использовать дифракционный метод контроля качества изделий, выполненных методом трехмерной печати. В статье описаны схема проведения контроля, алгоритм моделирования дифракционных картин с использованием выражения Релея — Зоммерфельда и компьютерная программа, реализующая указанный алгоритм. Приведены результаты определения размеров и расположения дефектов в изделиях по дифракционным картинам.

Рассматривается компьютерная модель такого дифракционного метода, который может быть реализован в виде аппаратно-программных средств, позволяющих автоматизировать процесс контроля, обеспечить его низкую себестоимость, безопасность (учитывая свойства электромагнитного излучения указанного диапазона длин волн) и может конкурировать с методами электромагнитной и звуковой томографии.

Ключевые слова: аддитивная технология, трехмерная печать, терагерцовое излучение, дифракционный метод, неразрушающий контроль, компьютерное моделирование, обработка изображения.

1. Введение. В настоящее время все большую роль в производстве изделий различного назначения играет использование аддитивных технологий. В общем смысле под аддитивной технологией понимается технология изготовления изделий послойным формированием их структуры [1]. Сегодня существует множество способов «послойного формирования» изделия при его изготовлении по аддитивной технологии, при этом наиболее распространенными являются следующие способы:

- стереолитография (SL — Stereolithography) [2];
- нанесение термопластов (FDM — 0151 Fused Deposition Modeling) [3];

– лазерное спекание порошковых материалов (SLS — Selective Laser Sintering) [4];

– изготовление объектов с использованием ламинирования (LOM — Laminated Object Manufacturing) [5].

Частным случаем аппаратной реализации аддитивных технологий являются 3D принтеры, реализующие указанные способы при трехмерной печати изделий. Данная технология позволяет изготовить детали и даже конструкцию, предварительно разработанную с помощью трехмерного компьютерного моделирования формы с заданными в электронном виде геометрическими параметрами и характеристиками и при необходимости различающимися по структуре и физико-химическим характеристикам слоями. В отличие от традиционных машиностроительных способов при такой технологии окончательное изделие получается не удалением лишнего материала (обработка резанием) и не формованием однородной структуры с целью получения требуемых контуров (литьё, обработка давлением и т.д.), а наращиванием (напылением) порошкообразного или жидкого вещества с последующим его закреплением. Это дает уникальную возможность получать изделия сложной формы с контролируемой неоднородностью по внутренней структуре, которую невозможно реализовать традиционными способами, например штамповкой или резанием. Это, в свою очередь, позволяет выполнять детали, которые раньше можно было изготовить лишь сборкой. Кроме того, «ажурная», но сложная форма деталей, выполненных по аддитивным технологиям, позволяет снизить их массово-габаритные характеристики без потери прочности по сравнению с деталями, выполненными традиционно.

Учитывая, что процесс трехмерной печати полностью автоматический, по переданной компьютером программе, без использования ручного труда в принципе, произведенная по такой технологии продукция имеет значительно меньшую себестоимость, чем при традиционном производстве, и допускает полную роботизацию производственного процесса. При этом по своим физико-механическим характеристикам (прочность, твердость, износостойкость и пр.) такие изделия, выполненные методом напыления, ничем не уступают деталям, изготовленным из цельных кусков (отливок, болванок, паковок) материала, а иногда и превосходят их. Здесь следует отметить, что речь в данном случае идет не только о предметах, изготавливаемых из сталей и металлов, но и из полимеров, силикатов, смесей на основе целлюлозы и прочее [4]. Кроме того, при аддитивной технологии некоторые элементы, ранее изготавливаемые из металлических сплавов, целесообразнее изготавливать из неметаллов без потери их конструктивных свойств. Аддитивные технологии предлагается применять в таких от-

раслях промышленности, как автомобиле- и самолетостроении, электронике, медицине. Однако одним из ограничений широкого практического применения деталей, выполненных по аддитивной технологии, связано с наличием внутренних дефектов, которые образуются при спекании технологических слоев и являются особенностью данной технологии. Таковыми дефектами являются:

- поры, образованные при затвердевании или кристаллизации технологических слоев изделия;
- поры или микротрещины, образованные по причине локального отсутствия абсорбционного сцепления технологических слоев;
- микротрещины, возникшие при локальных температурных напряжениях в формируемой детали при ее производстве.

Размеры данных дефектов во многом определяются толщиной слоев, из которых формируются детали и составляют от ~ 0.1 до 1 мм. При этом размещение дефектов возможно в каждом последующем слое. Наличие указанных дефектов в ряде случаев не позволяет реализовать одно из основных преимуществ деталей, выполненных по аддитивным технологиям, а именно снизить их массово-габаритные характеристики без потери прочности по сравнению с деталями, выполненными традиционно.

Сегодня для обнаружения этих дефектов используются в основном ультразвуковые способы контроля, однако из-за расположения указанных дефектов один над другим, данный способ не всегда позволяет обнаружить все дефекты. Таким образом, актуальной является задача неразрушающего контроля внутренних дефектов структуры изделий, произведенных с использованием аддитивной технологии, в частности трехмерной печати.

2. Миллиметровые электромагнитные волны. В бесконтактных неразрушающих методах контроля качества широко используются рентгеновское и гамма-излучение, в частности способ рентгеновской томографии [6]. Сдерживающим фактором использования этих видов излучения является их опасность для человека. По этой же причине они не могут быть применены к биологическим объектам, производимым по аддитивным технологиям.

Терагерцовое излучение (частота $\nu = 3 \cdot 10^{11} - 3 \cdot 10^{12}$ Гц, длина волны $\lambda = 0,1 - 1$ мм) является безопасным для человека. В настоящее время существуют мощные монохромные генераторы, позволяющие получить достаточно мощное монохромное излучение с миллиметровой и субмиллиметровой длиной волны [7-11]. Терагерцовое излучение используется в аэропортах в сканерах для поиска запрещённых предметов (оружия, взрывчатки), проносимых на борт самолетов [12-14]. Оно свободно проникает через такие материалы, как пластик, керамика, полимеры, целлюлоза, большинство биоматериалов [15, 16].

В качестве источника миллиметрового монохромного излучения может быть использован терагерцовый лазер на свободных электронах [17]. В качестве приемника целесообразно использовать болометрческую матрицу, предельную в [18]. Данный приемник позволяет получить двумерную картину излучения, прошедшего сквозь исследуемый материал без использования криогенных температур [19].

Следует отметить, что при длине волны монохромного терагерцового излучения порядка 1 мм оно должно дифрагировать на непрозрачных для него или отличающихся по оптической структуре внутренних элементах материалов с размерами того же порядка. К этим элементам могут относиться различные дефекты структуры материала: трещины, заполненные воздухом или водой, абсолютно непрозрачной для терагерцового излучения, вкрапления металлов в диэлектрик и прочее.

3. Дифракция на дефектах изделий, выполненных по аддитивной технологии. Решение классической задачи томографии вне зависимости от используемого для просвечивания объекта излучения связано выполнением съемки при облучении с разных ракурсов с последующим решением уравнений Радона для зафиксированных значений интенсивности сигнала в разных направлениях [20, 21]. Отсюда вытекают недостатки подобных томографических методов, связанные с заметными временными затратами на съемку и сложностью вычислений решений интегральных уравнений для последующей визуализации результатов.

Дифракционные методы контроля качества [22] позволяют, основываясь на явлении дифракции Фраунгофера, с достаточной степенью точности определять геометрические параметры (линейные и угловые) элементов структуры изделий. Однако эти методы, использующие в качестве источника излучения оптический лазер, позволяют фиксировать только видимые дефекты, расположенные обычно на поверхности материала. Кроме того, дифракционная картина в приближении Фраунгофера строится при условии, что расстояние до экрана значительно превышает линейные размеры как исследуемого элемента структуры, так и расстояния между получаемыми дифракционными максимумами. Это фактически позволяет считать расстояние между объектом и экраном бесконечно большим и фиксировать геометрические размеры элементов структуры материала только в двух измерениях (в плоскости исследуемого объекта, которая параллельна плоскости экрана с дифракционной картиной). Условием допустимости рассмотрения явления дифракции в приближении Фраунгофера является [23]:

$$ka^2 \left(\frac{1}{D_p} + \frac{1}{D_q} \right) \ll 1, \quad (1)$$

где $k = 2\pi/\lambda$, λ — длина волны, a — линейный размер рассеивающей свет неоднородности, D_q — расстояние от источника света до рассеивающей свет неоднородности, D_p — расстояние от нее до экрана, где проецируется дифракционная картина. Если же отказаться от прибли-

жения Фраунгофера и рассмотреть дифракцию Френеля при расстоянии от объекта до экрана, соизмеримое по величине как с размерами неоднородности внутри объекта, рассеивающей проходящее через него излучение, так и с длиной волны излучения:

$$ka^2 \left(\frac{1}{D_p} + \frac{1}{D_q} \right) \gg 1, \quad (2)$$

то для построения модели изображения дифракционной картины можно воспользоваться выражением Релея — Зоммерфельда [24]:

$$U(P_0) = \frac{1}{i\lambda} \iint_{S_i} U(P_I) \frac{\exp(ikr)}{r} \cos \theta dS, \quad (3)$$

где $U(P_0)$ — комплексная амплитуда излучения в точке P_0 на экране, $U(P_I)$ — комплексная амплитуда излучения в точке P_I внутри объекта, r — расстояние между точками P_0 и P_I , λ — длина волны излучения, θ — угол между нормалью из точки P_I к плоскости экрана и вектором r из точки P_0 в точку P_I , i — мнимая единица, S_i — поверхность, содержащая семейство точек P_I . Важной особенностью выражения (3) является использование в подынтегральном выражении расстояния r от точки неоднородности до точки на экране. Это означает, что полученная при облучении объекта дифракционная картина будет содержать информацию не только о высоте и ширине неоднородности, но и о ее глубине, а также о расстоянии от нее до экрана. В качестве такой неоднородности может выступать, например, трещина в толще материала. Для получения дифракционной картины используются электромагнитные волны такой длины, чтобы сам материал был для них прозрачен, а трещина выступала в качестве рассеивающего излучение препятствия.

4. Алгоритм моделирования дифракции Френеля. На рисунке 1 приведена схема оптической установки для получения дифракционной картины при вышеуказанных условиях. Параллельный пучок электромагнитных волн 1 облучает дефект 2, в грубом упрощении представляющий собой параллелепипед. На расстоянии L от контролируемого дефекта находится плоский экран 3, расположенный перпендикулярно пучку излучения, на который и проецируется дифракционная картина. Плоский угол θ между осью Z и вектором r . Перепишем выражение (3) в следующем виде:

$$U(x, y) = \frac{1}{i} \int_{-\infty}^{+\infty} \int U(\xi, \eta, L) \frac{\exp(ikr)}{r\lambda} \cos \theta d\xi d\eta, \quad (4)$$

где предполагается, что сечение пучка и размеры экрана бесконечны, толщина трещины (вдоль оси Z) крайне мала по сравнению с ее шириной (вдоль оси ξ) и высотой (вдоль оси η).

На рисунке 2 представлена упрощенная форма дефекта с указанием его геометрических размеров.

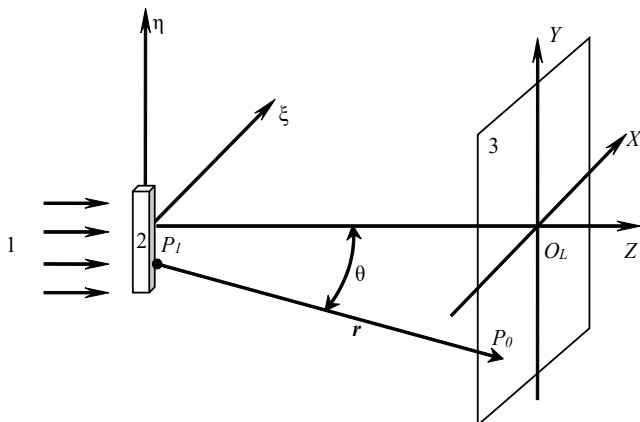


Рис. 1. Схема установки получения дифракционной картины: 1 — пучок излучения; 2 — дефект; 3 — экран

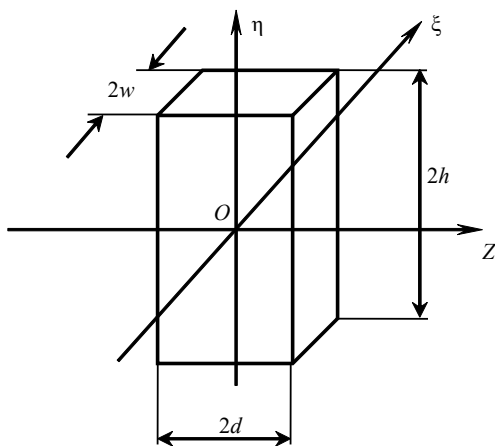


Рис. 2. Упрощенная форма контролируемого дефекта и его геометрические параметры

Оси координат пересекаются строго в центре параллелепипеда, который имеет ширину $2w$, высоту $2h$ и толщину $2d$. В данном случае не будем пренебрегать размерами дефекта вдоль оси Z . В реальности дефект будет представлять собой темное отверстие, то есть препятствие, внутри свободно пропускающее используемые волны материала. Однако, воспользовавшись теоремой Бабиня, дефект-препятствие

для расчета дифракционной картины можно трактовать как яркое отверстие, в пределах которого интенсивность сигнала $I=UU^*>0$ (U^* — величина, комплексно сопряженная с амплитудой сигнала U), а вне его $I=0$. В этом случае интеграл (4) можно переписать в виде:

$$U(x, y) = \frac{I}{i} \int_{L-d}^{L+d} \int_{-h-w}^h \int_{-w}^w \left[\frac{z}{r^2 \lambda} \cos \frac{2\pi r}{\lambda} + i \frac{z}{r^2 \lambda} \sin \frac{2\pi r}{\lambda} \right] d\xi d\eta dz, \quad (5)$$

где расстояние r от точки с координатами (x, y) на экране до точки внутри дефекта с координатами ξ и η , находящейся на расстоянии z от плоскости экрана:

$$r = \sqrt{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 + z^2}. \quad (6)$$

На рисунке 3 изображена схема изображения модели дифракционной картины. Соседние дифракционные максимумы M находятся на расстояниях Δ друг от друга.

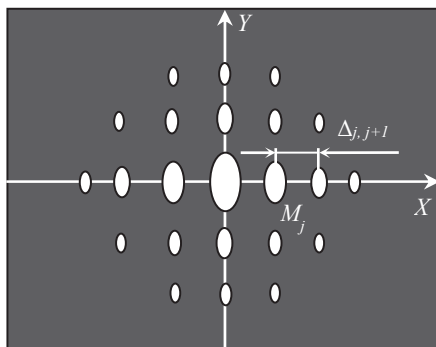


Рис. 3. Схема изображения дифракционной картины

Среднее расстояние между соседними дифракционными максимумами может быть определено по формуле:

$$\bar{\Delta} = \frac{\sum_{j=0}^{j_{\max}} \Delta_{j, j+1}}{j_{\max}}, \quad (7)$$

где $\Delta_{j, j+1}$ — расстояние между соседними дифракционными максимумами M_j и M_{j+1} ; j — индекс максимума, где $j=0$ — индекс центрального дифракционного максимума, j_{\max} — индекс последнего наблюдаемого (наиболее удаленного от центрального) дифракционного максимума. Вышеуказанное моделирование проводилось при следующих условиях.

Рассматривалась задача обнаружения дефектов в изотропном для терагерцового излучения материале при поперечном размере пучка излучения значительно меньше размеров изделия. Предполагается, что при проведении бесконтактного контроля качества изделия по данному методу источник излучения в виде терагерцового лазера с одной стороны, и матрица регистрации прошедшего излучения — с другой, будут расположены вплотную к контролируемому образцу для исключения прохождения излучения через иные среды, нежели материал изделия. Вышеуказанные условия необходимы для исключения влияния эффекта поляризации излучения в материале, а также исключения влияния границ изделия на дифракционную картину и преломления излучения при прохождении через границу между изделием и окружающей его средой (например, воздух). Алгоритм моделирования изображения дифракционной картины при прохождении монохромного излучения с миллиметровой длиной волны через изделие, выполненное из однородного изотропного материала и содержащее дефект (трещину), который приближенно может быть представлен в виде параллелепипеда, вытянутого вдоль оси Y (рисунок 1), состоит из следующих шагов.

Шаг 1. Задаются размеры h , w , d дефекта (рисунок 2) и расстояние от центра дефекта до экрана с изображением дифракционной картины. Задается шаг интегрирования Δ .

Шаг 2. Выполняется обход поля изображения дифракционной картины с шагом в 1 пиксель.

Шаг 3. В каждой точке изображения с координатами (x_m, y_n) выполняется расчет комплексной амплитуды терагерцового сигнала по следующему алгоритму.

Шаг 3.1. Обнуляется начальное значение комплексной амплитуды в выбранной точке изображения на экране $U(x_m, y_n) = 0$.

Шаг 3.2. Внутри объема дефекта берется точка с координатами $(-w, -h, z_{\min})$ — левая нижняя наиболее удаленная точка внутри дефекта, если смотреть со стороны экрана.

Шаг 3.3. Рассчитывается расстояние r от точки (x_m, y_n) до точки $(-w, -h, z_{\min})$ внутри дефекта по формуле (6).

Шаг 3.4. Рассчитывается подинтегральное выражение формулы (5).

Шаг 3.5. Рассчитанное на шаге 3.4 значение добавляется к накапливаемому значению $U(x_m, y_n)$.

Шаг 3.6. Осуществляется переход в точку с координатами $(-w + \Delta, -h, z_{\min})$. Повторяются шаги 3.2-3.5. После этого происходит переход в точку $(-w + 2\Delta, -h, z_{\min})$ и так далее.

Шаг 3.7. После достижения точки $(w, -h, z_{\min})$ шаги 3.2-3.5 повторяются для точек $(-w, -h + \Delta, z_{\min})$, $(-w + \Delta, -h + \Delta, z_{\min})$, $(-w + 2\Delta, -h + \Delta, z_{\min})$ и так далее.

Шаг 3.8. После достижения точки (w, h, z_{\min}) шаги 3.2-3.5 повторяются для точек $(-w, -h, z_{\min}+\Delta)$, $(-w+\Delta, -h, z_{\min}+\Delta)$, ..., $(-w, -h+\Delta, z_{\min}+\Delta)$ и так далее. Таким образом, осуществляется интегрирование по формуле (5) по всему объему дефекта.

Шаг 4. В результате выполнения шагов 3.1-3.8 вычисляется комплексная амплитуда сигнала U для точки на экране с координатами x_m и y_n .

Шаг 5. Для всех точек экрана с шагом в 1 пиксель выполняются шаги 2-4. В результате вычисляется поле значений комплексных амплитуд сигнала на экране.

Шаг 6. По вычисленным на шаге 5 значениям комплексных амплитуд вычисляются значения интенсивности терагерцового сигнала в каждой точке экрана по формуле:

$$I(x_m, y_n) = U(x_m, y_n)U^*(x_m, y_n), \quad (8)$$

где $I(x_m, y_n)$ — интенсивность сигнала в точке экрана с координатами, $U(x_m, y_n)$ и $U^*(x_m, y_n)$ — амплитуда сигнала и величина, комплексно сопряженная с ней в этой же точке экрана.

5. Программа моделирования дифракционных картин. На листинге 1 представлена реализация алгоритма на языке C++.

```

for(int n=0, Y = -0.5*Ws; n<Vimage; n++, Y+=1.0)
{
    for(int m=0, X = -0.5*Hs; m<Himage; m++, X+=1.0)
    {
        Re = 0;
        Im = 0;
        for(double z = zmin; z <= zmax; z+=delta)
        {
            for(double y = -h; y <= h; y+=delta)
            {
                for(double x = -w; x <= h; x+=delta)
                {
                    Dx = x-X; Dy = y-Y;
                    r2 = Dx*Dx+Dy*Dy+z*z;
                    zOnr2lambda = z/(r2*lambda);
                    argCosSin = TwoPiOnLambda*sqrt(r2);
                    Re+=zOnr2lambda*cos(argCosSin);
                    Im+=zOnr2lambda*sin(argCosSin);
                }
            }
        }
        pfld->setSignal(m, n, Re, Im);
    }
}

```

Листинг 1. Моделирование дифракционной картины

Для моделирования дифракционных картин была разработана оригинальная компьютерная программа моделирования распределения комплексной амплитуды терагерцового сигнала в дифракционной картине. Первый и второй циклы выполняют попиксельный обход моделируемого изображения. Далее для каждой точки дифракционной картины выполняется численное интегрирование (5) в пределах контролируемого дефекта вдоль осей Z , Y и X с шагом δ . Результат интегрирования — комплексное число (Re , Im) — записывается для точки дифракционной картины с помощью метода *setSignal*.

После получения таким образом поля комплексных амплитуд *pfld* оно визуализируется в виде цифрового изображения. На рисунке 4 приведено в качестве примера изображение модели дифракционной картины для дефекта с размерами $d = 0,05$ мм, $h = 1,50$ мм, $w = 0,50$ мм, с расстоянием между контролируемым дефектом и экраном $L = 100,00$ мм при длине волны излучения $\lambda = 0,15$ мм и при шаге интегрирования $0,05$ мм.

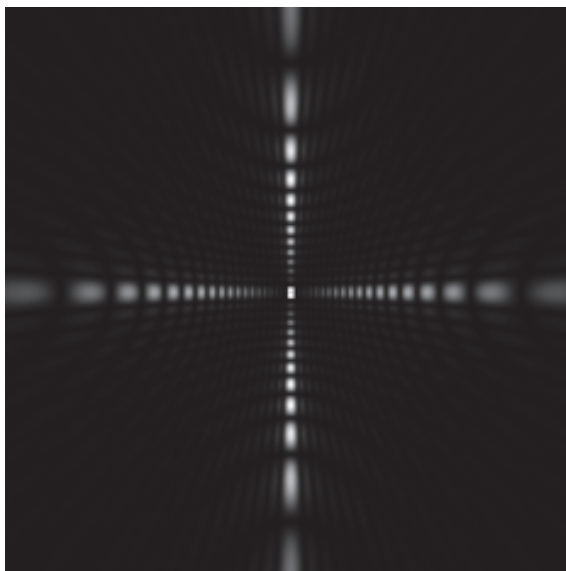


Рис. 4. Дифракционная картина дефекта с размерами $d = 0,05$ мм, $h = 1,50$ мм, $w = 0,50$ мм (расстояние между контролируемым дефектом и экраном $L = 100,00$ мм при длине волны излучения $\lambda = 0,15$ мм и при шаге интегрирования $0,05$ мм)

Расстояния между соседними дифракционными максимумами определяются программно по методу, описанному в [25].

На рисунке 5 для сравнения приведена реальная дифракционная картина, появляющаяся на экране при освещении дефекта внутри однородной оптически прозрачной среды.

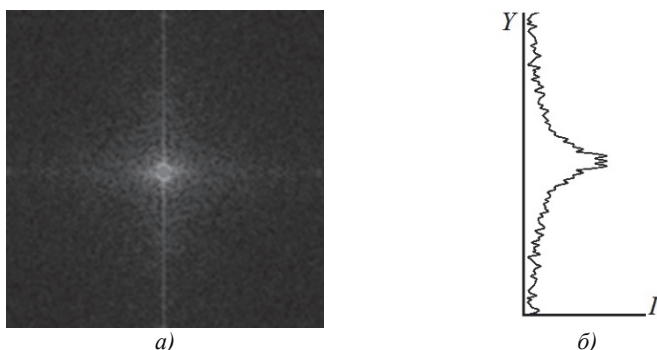


Рис. 5. Дифракционная картина реального дефекта с размерами $0,06 \times 1,91 \times 0,83$ мм (расстояние между контролируемым дефектом и экраном $L = 100,00$ мм при длине волны излучения $\lambda = 0,63$ нм)

Из приведенной на рисунке 5б диаграммы распределения интенсивности сигнала I видно присутствие дифракционных максимумов вдоль оси Y изображения, хотя и расположенных значительно чаще и не так четко выделяющихся на цифровой фотографии по сравнению с моделируемой дифракционной картине, что можно объяснить используемым источником излучения с более короткой волной.

6. Определение геометрических параметров внутренних дефектов по дифракционным картинам. С помощью программы моделирования дифракционной картины были построены и проанализированы изображения дифракционных картин для дефектов разных размеров.

В таблице 1 сведены средние расстояния между дифракционными максимумами в зависимости от размера исследуемых дефектов. Величины средних расстояний округлены до целых значений в миллиметрах.

Моделирование дифракционных картин проводилось при $L = 500$ мм, $\lambda = 0,1$ мм и шаге интегрирования $0,1$ мм.

Таблица 1. Зависимость среднего расстояния между дифракционными максимумами от размеров контролируемого дефекта

Трещина, размеры			Сред. расст. между диф. макс.	
d , мм	h , мм	w , мм	Δсред.гориз., мм	Δсред.вертик., мм
1,00	3,00	0,50	10	21
1,00	3,00	3,00	10	10
1,00	3,00	1,00	10	17
1,00	2,00	1,00	16	23
1,00	2,00	0,50	17	29

Для различных размеров дефекта наблюдались различные средние расстояния между дифракционными максимумами. Таким образом, составив библиотеку расчетных дифракционных картин, методом сравнения с картинками реальных объектов трехмерной печати можно определять характер внутренних дефектов. Как было указано выше, рассматриваемая в данной статье модель дифракции не учитывает возможной поляризации терагерцового излучения в материале изделия, выполненного по аддитивной технологии. Предполагается, что этот материал является изотропным с точки зрения распространения в нем миллиметровых волн. В случае поляризации излучения в материале, изготовленном, например, по технологии FDM, в расчетную модель по выражению (5) должны быть введены коэффициенты учета поляризации. Также в предложенном алгоритме моделирования могут быть учтены два и более дефектов. В этом случае интегрирование должно проводиться по нескольким областям, соответствующим моделируемым дефектам, что увеличивает объем вычислений и в дальнейшем поднимает проблему оптимизации алгоритма интегрирования. Следует также отметить, что предлагаемая компьютерная модель исходит из предположения, что при осуществлении дифракционного контроля качества с помощью терагерцового лазера поперечный диаметр его луча существенно меньше размеров изделия, что позволяет не учитывать в модели дифракции излучения на боковых границах изделия. С использованием программы [26] был проведен анализ интенсивности светового сигнала в моделируемом изображении дифракционной картины. Так как использовалось компьютерное изображение дифракционной картины дефекта, то интенсивность светового сигнала каждой точки (пикселя) изображения могло принимать целое значение от 0 до 255 (интенсивность центрального максимума). Полученные результаты сведены в таблицу 2.

Программа [26] вычисляла суммарную интенсивность всех пикселей изображения, среднюю интенсивность, то есть суммарную интенсивность, отнесенную к площади изображения, и дисперсию интенсивности для дефектов различного размера при длине волны $\lambda = 0,1$ мм, шаге интегрирования 0,01 мм и расстоянии от центра трещины до экрана $L = 100$ мм. Анализ суммарной и средней интенсивности показывает, что при одинаковых размерах сечения дефекта (ширина и высота) с увеличением его глубины снижаются суммарная и средняя интенсивности светового сигнала. Характерная зависимость средней интенсивности для трещины с $h = 1,00$ мм и $w = 0,50$ мм приведена на рисунке 6.

Таблица 2. Зависимость размеров центрального светового пятна и общих параметров интенсивности от размера дефекта в направлении распространения излучения

Трещина			Размеры центрального пятна		Параметры интенсивности пикселей изображения		
d, мм	h, мм	w, мм	Ширина, мм	Высота, мм	Дисперсия	Сумм. интенсивн.	Сред. интенсивн.
0,50	1,00	0,50	9	11	30,316	29794	0,477
1,00	1,00	0,50	9	11	29,504	25089	0,398
1,50	1,00	0,50	7	10	29,433	22763	0,366
2,00	1,00	0,50	8	10	28,811	21223	0,341
2,50	1,00	0,50	9	11	28,188	20164	0,318
3,00	1,00	0,50	9	11	28,216	19230	0,306
1,00	3,00	0,10	9	4	12,557	12891	0,204
3,00	3,00	0,10	9	4	12,306	10812	0,171
1,00	3,00	0,25	9	4	12,051	12442	0,199
3,00	3,00	0,25	1	2	11,684	10512	0,166
1,00	3,00	1,50	9	7	10,584	11415	0,182
3,00	3,00	1,50	9	7	10,334	9817	0,156
1,00	3,00	2,00	9	6	11,746	12259	0,195
3,00	3,00	2,00	1	6	11,766	10585	0,171
1,00	3,00	2,50	9	10	11,373	12021	0,193
3,00	3,00	2,50	1	1	11,306	10453	0,169

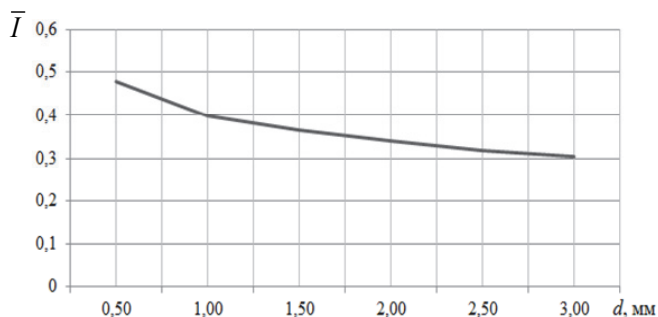


Рис. 6. Зависимость средней интенсивности светового сигнала от размера дефекта с параметрами $h = 1,00$ мм, $w = 0,50$ мм и $d \in [0,50; 3,00]$ мм в направлении распространения излучения

Выявленная зависимость позволяет, используя дифракционную картину, определять не только геометрические размеры сечения дефекта в плоскости, перпендикулярной направлению распространения излучения, но и его глубину в направлении распространения излучения.

7. Определение расположения дефекта внутри изделия. Соизмеримость расстояний между источником излучения миллиметровых волн, объектом исследования и экраном означает возможность рассмотрения возникающей в этом случае дифракции в приближении Френеля. В этом случае на расположение дифракционных максимумов на экране влияют не только форма и размеры трещины, но и расстояние от трещины до экрана. Таким образом, появляется возможность определения примерного расположения дефекта на оси Z , то есть определения, в каком слое материала, полученном по аддитивной технологии, этот дефект находится.

В таблице 3 приведена зависимость среднего расстояния между соседними дифракционными максимумами, расположенными на оси X , от расстояния между трещиной внутри исследуемого объекта и плоскостью XU экрана с дифракционной картиной. Моделирование проводилось для трещины с размерами $d = 0,05$ мм, $h = 1,50$ мм и $w = 0,50$ мм при длине волны излучения $\lambda = 0,15$ мм и шаге интегрирования $0,05$ мм для величин расстояний между трещиной и экраном L от 70 мм до 100 мм.

Таблица 3. Зависимость среднего расстояния между дифракционными максимумами от расстояния L между трещиной и экраном

L , мм	$\bar{\Delta}$, мм
70,00	17,25
75,00	18,47
80,00	19,72
85,00	20,94
90,00	22,16
95,00	23,41
100,00	24,63

На рисунке 7 указанная зависимость изображена в виде графика.

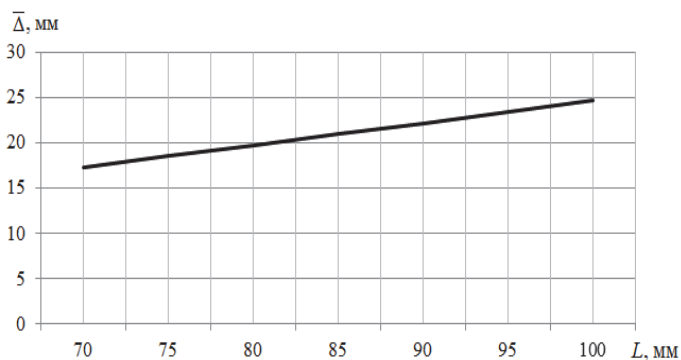


Рис. 7. Увеличение среднего расстояния между дифракционными максимумами с удалением трещины от экрана

Из приведенного графика следует, что с увеличением расстояния между трещиной и экраном, на котором проецируется дифракционная картина, возрастает и среднее расстояние между дифракционными максимумами.

8. Заключение. Приведенные данные свидетельствуют о том, что бесконтактную неразрушающую дефектоскопию изделий, изготовленных по аддитивной технологии из веществ, прозрачных для электромагнитного излучения с длинами волн 0,1-1 мм, можно осуществлять не только методом рентгеновской томографии, но и более безопасным (с точки зрения используемого излучения) и более простым (с точки зрения реализации) дифракционным методом, использующим терагерцовое монохромное излучение. Он позволяет в автоматическом режиме и с высокой скоростью, без проведения съемки с разных ракурсов и разрушения объекта исследования, не только выявлять наличие скрытого дефекта структуры в объекте, изготовленном по аддитивной технологии, но и оценивать его геометрические размеры и пространственное расположение в контролируемой детали. Для реализации предлагаемого метода достаточно источника когерентного излучения с фиксированной длиной волны в диапазоне от 0,1 до 1 мм и экрана, чувствительного к вышеуказанному излучению, с устройством преобразования интенсивности принятого сигнала в цифровой компьютерный формат.

Компьютерное моделирование дифракции миллиметровых волн позволяет получить изображения дифракционных картин для дефектов различных размеров, конфигурации и расположения внутри исследуемого объекта, что позволяет построить зависимости для определения

параметров дефекта на основании средней интенсивности светового сигнала и среднего расстояния между дифракционными максимумами. По этим зависимостям можно будет оценить характер и параметры реальных дефектов при сопоставлении моделируемых эталонных изображений с истинными дифракционными картинками, полученными при облучении терагерцовым лазером изделия, изготовленного по аддитивной технологии (решение обратной задачи).

При этом нет необходимости производить съемку объекта с нескольких ракурсов, как этого требует использование томографических методов, с последующим ресурсоемким решением достаточно сложных уравнений Радона. Информацию о расположении и геометрических размерах дефекта в трехмерном пространстве можно получить из анализа расположения дифракционных максимумов. Полученной таким образом информации достаточно для утверждения о присутствии дефекта в готовом изделии и принятия решения о более точном определении его местоположения и границ с помощью томографии либо вскрытии изделия и его перепечатывания, начиная с дефектного слоя, или оценки прочностных характеристик изделия с учетом присутствия дефекта и принятия решения о допустимости его использования либо отбраковки.

Литература

1. Григорьев С.Н., Смуров И.Ю. Перспективы развития инновационного аддитивного производства в России и за рубежом // Инновации. 2013. № 10(180). С. 76–82.
2. Lee M.P. et al. Development of a 3D printer using scanning projection stereolithography // Scientific Reports. 2015. vol. 5. no. 9875.
3. Han S. et al. Design and Analysis of Fused Deposition Modeling 3D Printer Nozzle for Color Mixing // Advances in Materials Science and Engineering. 2017. vol. 2017. Article ID 2095137.
4. Shirazi S.F.S. et al. A review on powder-based additive manufacturing for tissue engineering: selective laser sintering and inkjet 3D printing // Science and Technology of Advanced Materials. 2015. vol. 16. no. 3(033502).
5. Gu B.K. et al. 3-dimensional bioprinting for tissue engineering applications // Bio-materials Research. 2016. vol. 20. no. 12.
6. Клюев В.В. и др. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник / под ред. В. В. Клюева // М.: Машиностроение. 1995. 488 с.
7. Zhang X. C., Xu J. Introduction to THz Wave Photonics // Springer Science & Business Media. 2010. 246 p.
8. Carr G.L. et al. High-power terahertz radiation from relativistic electrons // Nature. 2002. vol. 420. pp. 153–156.
9. Кулипанов Г.Н. Лазеры на свободных электронах: новый этап развития // Наука в Сибири. 2010. № 50(2785). С. 4.
10. Tan P. et al. Terahertz radiation sources based on free electron lasers and their applications // Science China Information Sciences. 2012. vol. 55. Issue 1. pp. 1–15.
11. Kulipanov G.N. et al. Novosibirsk free electron laser – facility description and recent experiments // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. 2015. vol. 5. Issue 5. pp. 798–809.
12. Davies A.G. et al. Terahertz spectroscopy of explosives and drugs // Materials Today. 2008. vol. 11. Issue. 3. pp. 18–26.

13. *Leahy-Hoppa M.R.* Terahertz For Weapon And Explosive Detection // WIT Transactions on State of the Art in Science and Engineering. 2012. vol. 54. pp. 207–220.
14. *Воронин С.А., Сохабеев В.М.* Использование терагерцовых технологий в до-смотровой технике обеспечения авиационной безопасности // Научный вестник ГОСНИИ ГА. 2012. № 2(313). С. 116–121.
15. *Lee Y.-S.* Principles of Terahertz Science and Technology // Springer Science & Business Media. 2009. 340 p.
16. *Gatesman A.J. et al.* Terahertz Behavior of Optical Components and Common Materials // Technical rept. Massachusetts Univ Lowell Submillimeter-Wave Tech Lab. 2006. URL: https://www.researchgate.net/publication/228718575_Terahertz_Behavior_of_Optical_Components_and_Common_Materials (дата обращения: 31.12.2017).
17. *Bolotin V.P. et al.* A project of accelerator-recuperator for Novosibirsk high-power FEL // Physics of particles and nuclei letters. 2006. vol. 3. pp. S40–S42.
18. *Чесноков В.В., Чесноков Д.В., Кочкарев Д.В., Кузнецов М.В.* Способ изготовления детекторов терагерцового диапазона // Патент РФ 2545497. 2015.
19. *Коротяев В.В. и др.* Основы тепловидения // СПб: НИУ ИТМО. 2012. 122 с.
20. *Марусина М.Я., Казначеева А.О.* Современные виды томографии. Учебное пособие // СПб: СПбГУ ИТМО. 2006. 132 с.
21. *Deans S.R.* The Radon Transform and Some of Its Applications // Courier Corporation. 2007. 295 p.
22. *Кофнов О.В.* Система компьютерного моделирования дифракции для измерения геометрических параметров структуры текстильных материалов // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1. Естественные и технические науки. 2014. № 2. С. 38–45.
23. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Теоретическая физика. Теория поля. т.2 // М.: Наука. 1988. 509 с.
24. *Гудмен Дж.* Введение в Фурье-оптику // М.: Мир. 1970. 364 с.
25. *Кофнов О.В.* Модель и алгоритмы измерения геометрических параметров структур текстильных материалов // Труды СПИИРАН. 2015. Вып. 5(42). С. 90–111.
26. *Михайленко А.В., Лебедев Е.Л., Кофнов О.В.* Программа обработки данных цифровых изображений // 2017. № 2017611188.

Кофнов Олег Владимирович — к-т техн. наук, научный сотрудник кафедры информационных технологий, Санкт-Петербургский государственный университет технологии и дизайна (СПбГУПТД). Область научных интересов: технология производства материалов, машинное зрение, обработка астрономических каталогов, программирование на Java и C#. Число научных публикаций — 17. kofnov@mail.ru; Большая Морская ул., 18, Санкт-Петербург, 191186; р.т.: +7(812)9413288.

Лебедев Евгений Леонидович — д-р техн. наук, доцент, начальник кафедры контроля качества и испытаний вооружения, военной и специальной техники, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского (ВКА им. А.Ф. Можайского). Область научных интересов: бесконтактные методы контроля качества. Число научных публикаций — 64. zlebedev@yandex.ru; Ждановская, 13, Санкт-Петербург, 197198; р.т.: +7(812)347-9511.

Михайленко Александр Владимирович — адъюнкт кафедры контроля качества и испытаний вооружения, военной и специальной техники, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского (ВКА им. А.Ф. Можайского). Область научных интересов: бесконтактные методы контроля качества. Число научных публикаций — 11. tihaxis@mail.ru; Ждановская, 13, Санкт-Петербург, 197198; р.т.: +7(812)347-9511.

O.V. KOFNOV, E.L. LEBEDEV, A.V. MIKHAILENKO
**COMPUTER SIMULATION OF THE DIFFRACTION OF
 MILLIMETER ELECTROMAGNETIC WAVES TO DETECT
 INTERNAL DEFECTS OF PRODUCTS MADE USING ADDITIVE
 TECHNOLOGY**

Kofnov O.V., Lebedev E.L., Mikhailenko A.V. Computer Simulation of the Diffraction of Millimeter Electromagnetic Waves to Detect Internal Defects of Products Made using Additive Technology.

Abstract. The article describes the computer model of using electromagnetic waves with lengths from 0.1 mm to 1 mm for detection of internal defects of products made by additive technology.

Now additive technology and 3D printing use materials transparent for terahertz waves (frequency $3 \cdot 10^{11}$ - $3 \cdot 10^{12}$ Hz, wave length 0.1-1 mm). At the same time, defects in 3D printed products have sizes like a terahertz wave's length. Thus the Fresnel diffraction can be observed during illumination of a product with the same defects by monochromatic milliwaves.

Thereby the simulated diffraction method for 3D printed products quality checking can be applied. In this article the checking scheme, the diffraction pattern modeling algorithm using the Rayleigh – Sommerfeld integral, and the computer programme for this algorithm are described. The determination of sizes and positions of defects in products using diffraction patterns is shown.

The proposed diffraction method is fully automated and low-cost, uses safety electromagnetic radiation and can compete with tomography methods.

Keywords: additive technology, 3D printing, terahertz, diffraction, non-destructive quality checking, computer modeling, image processing.

Kofnov Oleg Vladimirovich — Ph.D., researcher of the information technology department, St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design (SPbSUITD). Research interests: technology, machine vision, astronomical catalogs processing, Java and C# programming. The number of publications — 17. kofnov@mail.ru; 18, Bolshaya Morskaya St., St. Petersburg 191186, Russia; office phone: +7(812)9413288.

Lebedev Eugeny Leonidovich — Ph.D., Dr. Sci., associate professor, head of quality control and testing of weapon department, Mozhaisky Military Space Academy. Research interests: non-contact quality control methods. The number of publications — 64. zlebedev@yandex.ru; 13, Zhdanovskaya street, St.-Petersburg, 197198, Russia; office phone: +7812)347-9511.

Mikhailenko Aleksandr Vladimirovich — Ph.D. student of quality control and testing of weapon department, Mozhaisky Military Space Academy. Research interests: non-contact quality control methods. The number of publications — 11. tihaxis@mail.ru; 13, Zhdanovskaya street, St.-Petersburg, 197198, Russia; office phone: +7(812)347-9511.

References

1. Grigor'ev S.N., Smurov I.Y. [Prospects for the development of innovative additive production in Russia and abroad]. *Innovacii – Innovations*. 2013. vol. 10(180). pp. 76–82. (In Russ.).
2. Lee M.P. et al. Development of a 3D printer using scanning projection stereolithography. *Scientific Reports*. 2015. vol. 5. no. 9875.
3. Han S. et al. Design and Analysis of Fused Deposition Modeling 3D Printer Nozzle for Color Mixing. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2017. vol. 2017. Article ID 2095137.
4. Shirazi S.F.S. et al. A review on powder-based additive manufacturing for tissue engineering: selective laser sintering and inkjet 3D printing. *Science and Technology of Advanced Materials*. 2015. vol. 16. no. 3 (033502).

5. Gu B.K. et al. 3-dimensional bioprinting for tissue engineering applications. *Bio-materials Research*. 2016. vol. 20. no. 12.
6. Klyuev V.V. et al. *Nerazrushayutshiy kontrol I diagnostika. Pod red. V.V. Klyueva* [Non-destructive quality checking and diagnosis. Edited by V.V. Klyuev]. M.: Mashinostroenie. 1995. 488 p. (In Russ.).
7. Zhang X. C., Xu J. Introduction to THz Wave Photonics. Springer Science & Business Media. 2010. 246 p.
8. Carr G.L. et al. High-power terahertz radiation from relativistic electrons. *Nature*. 2002. vol. 420. pp. 153–156.
9. Kulipanov G.N. [Free-electron lasers: the new stage of development]. *Nauka v Sibiri – Science in Siberia*. 2010. vol. 50(2785). pp. 4. (In Russ.).
10. Tan P. et al. Terahertz radiation sources based on free electron lasers and their applications. *Science China Information Sciences*. 2012. vol. 55. Issue 1. pp. 1–15.
11. Kulipanov G.N. et al. Novosibirsk free electron laser – facility description and recent experiment. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. 2015. vol. 5. Issue 5. pp. 798–809.
12. Davies A.G. et al. Terahertz spectroscopy of explosives and drugs. *Materials Today*. 2008. vol. 11. Issue 3. pp. 18–26.
13. Leahy-Hoppa M.R. Terahertz For Weapon And Explosive Detection. *WIT Transactions on State of the Art in Science and Engineering*. 2012. vol. 54. pp. 207–220.
14. Vorinin S.A., Sohabeev V.M. [Using the terahertz technology for air safety control devices]. *Nauchn'y vestnik GOSNII GA – Scientific bulletin of the Civil Aviation State Research Institute*. 2012. vol. 2(313). pp. 116–121. (In Russ.).
15. Lee Y.-S. Principles of Terahertz Science and Technology. Springer Science & Business Media. 2009. 340 p.
16. Gatesman A.J. et al. Terahertz Behavior of Optical Components and Common Materials. Technical rept. Massachusetts Univ Lowell Submillimeter-Wave Tech Lab. 2006. Available at: https://www.researchgate.net/publication/228718575_Terahertz_Behavior_of_Optical_Components_and_Common_Materials (accessed: 31.12.2017).
17. Bolotin V.P. et al. A project of accelerator-recuperator for Novosibirsk high-power FEL. *Physics of particles and nuclei letters*. 2006. vol. 3. pp. S40–S42.
18. Chesnokov V.V., Chesnokov D.V., Kochkarev D.V., Kuznetsov M.V. *Sposob izgotovleniya detectorov terahertzovogo diapazona* [Method of producing terahertz detectors]. Patent RF. no. 2545497. 2015. (In Russ.).
19. Korotayev V.V. et al. *Osnovy teplovideniya* [The basis of thermography]. SPb: ITMO. 2012. 122 p. (In Russ.).
20. Marusina M.Ya., Kaznacheeva A.O. *Sovremenn'ye vidy tomographii* [The modern tomography types]. SPb: ITMO. 2006. 132 p. (In Russ.).
21. Deans S.R. The Radon Transform and Some of Its Applications. Courier Corporation. 2007. 295 p.
22. Kofnov O.V. [Diffraction Simulation System for Measuring Geometrical Parameters of Structure of Textile Materials]. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta tekhnologii i dizajna – Vestnik of Saint Petersburg state university of technology and design*. 2014. vol. 2. pp. 38–42. (In Russ.).
23. Landau L.D., Lifshitz E.M. *Teoreticheskaya fizika. Teoriya polya* [Theoretical physics. Field theory]. M.: Nauka. 1988. 509 p. (In Russ.).
24. Goodman J.W. *Introduction to Fourier optics*. McGraw-Hill book company. 1968. 287 p. (Russ. ed.: Gudnov Dzh. *Vvedeniye v Fourier optiku*. M.: Mir. 1970. 364 p.).
25. Kofnov O.V. [Model and Algorithms for Measurement of Geometric Parameters in Textile Structures.]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*. 2015. vol. 5(42). pp. 90–111. (In Russ.).
26. Mikhailenko A.V., Lebedev E.L., Kofnov O.V. *Programma obrabotki dannyh tzirovyyh izobrazheniy* [The program for digital images processing]. 2017. no. 2017611188. (In Russ.).

Г.Н. МАЛЫЦЕВ, А.В. НАЗАРОВ, В.Л. ЯКИМОВ
**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ
БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ АВТОМАТИЧЕСКИХ
КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ДИСКРЕТНО-СОБЫТИЙНОЙ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ**

Мальцев Г.Н., Назаров А.В., Якимов В.Л. Исследование процесса диагностирования бортовой аппаратуры автоматических космических аппаратов с использованием дискретно-событийной имитационной модели.

Аннотация. Рассмотрены особенности функционирования космических аппаратов с высоким уровнем автономности как объектов технического диагностирования. Полагается, что бортовые средства контроля и диагностирования функционируют автономно и обращаются к наземным средствам только при невозможности решить задачи распознавания нештатных ситуаций и восстановления работоспособного состояния бортовой аппаратуры. Процесс диагностирования бортовой аппаратуры описывается с помощью графа состояний, учитывающего особенности обнаружения нештатных ситуаций бортовыми и наземными средствами. Разработанная имитационная модель позволяет учитывать накопление последствий отказов бортовой аппаратуры вследствие воздействия факторов внешней среды ближнего космоса и изменение интенсивности их возникновения. Представлены результаты имитационного моделирования процесса диагностирования космических аппаратов совместно бортовыми и наземными средствами системы информационно-телеметрического обеспечения. Показана важность наземного сегмента системы информационно-телеметрического обеспечения управления космических аппаратов при проведении плано-периодического углубленного анализа их технического состояния. По результатам имитационного моделирования проведен анализ влияния достоверности диагностирования бортовой аппаратуры на уровень автономности космических аппаратов дистанционного зондирования Земли.

Ключевые слова: космический аппарат, автономное функционирование, бортовая аппаратура, техническое состояние, диагностирование.

1. Введение. Диагностирование технического состояния (ТС) космических аппаратов (КА), как сложных технических систем, является составной частью информационно-телеметрического обеспечения управления КА и направлено на поддержку высокого уровня их эксплуатационной надежности в полете [1-3]. Реализация диагностирования и восстановления работоспособности бортовой аппаратуры (БА) КА преимущественно бортовыми средствами является современной тенденцией развития системы информационно-телеметрического обеспечения (СИТО) и непосредственно связана с повышением уровня автономности функционирования КА [3-5]. Очевидно, что с расширением возможностей бортовых средств диагностирования по выявлению нештатных ситуаций (НС) и их парированию будет увеличиваться время автономного функционирования КА. В то же время возможности наземного сегмента СИТО при решении задач контроля ТС и диагностирования БА КА объективно гораздо шире, чем

возможности бортового сегмента СИТО. Отсюда следует взаимосвязь достоверности диагностирования БА с длительностью интервала автономного функционирования КА и задача рационального распределения функций между наземными и бортовыми средствами по контролю ТС и диагностированию БА КА с высоким уровнем автономности функционирования. Представленные в статье результаты демонстрируют важность наземного сегмента СИТО для проведения планово-периодического углубленного анализа ТС БА КА с высоким уровнем автономности. В дальнейшем изложении под диагностированием БА будем понимать процесс распознавания НС и определения причины ее возникновения средствами бортового и наземного сегментов СИТО, реализуемый по результатам контроля ТС КА. Для исследования процессов функционирования сложных технических систем, в том числе КА, в настоящее время широкое распространение получили методы имитационного моделирования [6-12]. Достаточно подробно вопросы моделирования систем диагностирования сложных технических объектов рассмотрены в [9, 13]. Отличительными особенностями представленными в статье результатов являются: реализация дискретно-событийного подхода для имитационного моделирования процессов диагностирования КА с высоким уровнем автономности функционирования в наземном и бортовом сегментах СИТО управления КА; рассмотрение влияния характеристик бортовых и наземных средств контроля ТС и диагностирования БА на интервал надежного автономного функционирования и автономность КА; разработка новых достаточно общих динамических моделей развития НС в БА для различных этапов эксплуатации КА.

2. Анализ космических аппаратов с высоким уровнем автономности как объектов технического диагностирования. Применительно к автоматическим (непилотируемым) КА понятие автономности можно сформулировать как способность КА и его бортового комплекса управления (БКУ) к самостоятельному функционированию и выполнению полетных операций без информационного взаимодействия с наземным комплексом управления (НКУ). Автономность характеризуется различными уровнями и зависит, прежде всего, от функциональных возможностей БКУ, выполняющего в части информационно-телеметрического обеспечения управления КА функции бортового сегмента СИТО. При этом вводится понятие интервала автономного функционирования КА как интервала времени, в течение которого КА может функционировать без информационного взаимодействия с НКУ [14].

Вопросы функционирования существующей СИТО управления КА достаточно подробно рассмотрены в [1, 3, 15, 16]. Анализ данных источников показал, что для КА с высоким уровнем автономности

функционирования, как объектов технического диагностирования, можно выделить ряд особенностей (таблица 1).

Таблица 1. Особенности КА с различным уровнем автономности как объектов диагностирования

КА с высоким уровнем автономности	КА с низким уровнем автономности
Интервал автономного функционирования КА – несколько суток.	Интервал автономного функционирования КА – менее суток.
Обеспечивается высокая надежность КА и предъявляются требования ГОСТ к отсутствию развития последствий отказов БА.	Требования к высокой надежности КА и отсутствию развития последствий отказов БА не столь высоки.
Реализуются принципы физического и программного комплексирования бортовых средств и программного управления бортовыми системами, что позволяет отказаться от дополнительной контролирующей аппаратуры на борту.	Принципы физического и программного комплексирования бортовых средств, а также программного управления бортовыми системами реализуются не всегда.
Уменьшение объема телеметрической информации (ТМИ), передаваемой с КА в НКУ в штатном режиме функционирования.	В НКУ по возможности передается полный поток ТМИ.
Нахождение КА в частично работоспособном состоянии (ЧРС) в период автономного функционирования является допустимым.	Нахождение КА в ЧРС в период автономного функционирования является недопустимым.
Задачи контроля ТС и диагностирования БА преимущественно решаются с использованием бортовых средств, а при «тяжелых» отказах – с использованием средств НКУ.	Все задачи контроля ТС и диагностирования БА решаются с использованием средств НКУ.
Выполнение БКУ и НКУ широкого перечня функций по восстановлению работоспособности БА путем автономного управления переключением резервных комплектов и режимами работы БА.	Парирование отказов и восстановление работоспособности БА осуществляется только с использованием средств НКУ путем радиуправления переключением резервных комплектов и режимами работы БА.
Парирование отказов в НКУ путем коррекции программ функционирования и управления БА, программы телеизмерений, эксплуатационной документации.	
Расширенный состав моделей и методов в бортовых средствах диагностирования КА.	Использование в средствах диагностирования НКУ классических методов допускового контроля и тестирования БА.
Существенная необходимость проведения плано-периодического углубленного анализа ТС БА с использованием средств НКУ.	Необходимость проведения углубленного анализа ТС БА с использованием средств НКУ не существенна.

Диагностирование автономных КА с использованием средств НКУ осуществляется как в целях профилактики по выходу КА из режима автономного функционирования, так и при возникновении «тяжелых» отказов на борту КА [3]. Под «тяжелым» отказом понимается НС, для парирования которой необходимо задействовать средства диагностирования и управления НКУ. Сложность таких НС проявляется в трудности их распознавания при отсутствии в перечне рассмотренных в эксплуатационно-технической документации НС, а также в трудности их парирования и восстановления работоспособности средствами БКУ. При обнаружении «тяжелых» отказов обычно осуществляется автоматический перевод КА в специальный режим работы — неориентированный полет, в котором отсутствует риск негативного развития НС [3].

В ряде случаев НС предусматриваются эксплуатационно-технической документацией на КА и средства НКУ. При этом КА может находиться в ЧРС, в котором он способен выполнять функциональные задачи по предназначению с допустимыми ограничениями [17]. Учет ЧРС имеет важное значение при диагностировании БА КА с высоким уровнем автономности функционирования. Увеличение числа разрешенных ЧРС — одна из возможностей увеличить интервал автономного функционирования и повысить автономность КА. При этом формирование множества ЧРС представляет собой отдельную задачу, требующую индивидуального подхода для каждого типа КА.

Отказы БА обладают различной критичностью и, как правило, приводят к различным последствиям на борту КА. Кроме того, при проектировании сложных технических систем, в том числе КА, не всегда удается обеспечить отсутствие негативного развития НС, особенно при воздействии различных неучтенных факторов, в том числе внешней среды [18]. В таблице 2 представлена классификация НС, имевших место на практике при эксплуатации КА с высоким уровнем автономности, и показано их возможное влияние на показатель надежности БА КА — интенсивность потока отказов λ — с учетом возможностей наземных и бортовых средств СИТО. На основе сведений из таблицы 2 и имеющихся статистических данных о НС на борту реального КА уточним закономерности изменения интенсивности потока отказов БА. Для этого рассмотрим зависимость во времени суточной интенсивности потока отказов КА «Ресурс-ДК1» за период, равный 2.5 года летной эксплуатации, в течение которого произошло 29 отказов, в том числе 7 «тяжелых» [3]. На рисунке 1 представлены построенные по экспериментальным статистическим данным зависимости, характеризующие суточную интенсивность отказов БА за время летной эксплуатации КА [3]. Суммарная зависимость (кривая 1) может быть представлена как совокупность низкочастотного тренда (кривая 2) и высокочастотной составляющей (кривая 3). Кривая 4 соответствует участкам, на которых наблюдались «тяжелые» отказы.

Таблица 2. Влияние средств СИТО на характеристики потока отказов БА КА с высоким уровнем автономности

Тип НС		Действия по устранению НС и ее последствий	Задействованные средства СИТО		Влияние НС на λ	
			Бортовые	Наземные		
Неустраняемые НС		Внесение ограничений на целевое применение БА по назначению.		+	Уменьшение λ	
Парированные НС		Структурное резервирование БА.	+	+	$\lambda = \text{const}$	
		Повторное выполнение операций.	+	+		
		Перезапуск системы из «контрольных точек».	+	+		
		Срабатывание бортовых устройств защиты и автоматики.	+			
		Коррекция программ функционирования и управления БА, специального программного обеспечения БА, программы телеизмерений, эксплуат. документации в процессе летной эксплуатации.			+	Уменьшение λ
		Допущение ЧРС БА.	+			Увеличение λ
Функциональное резервирование БА.			+			
Другие НС	Пропущенные и неправильно распознанные на борту НС, самоустраняющиеся отказы и сбои.	Возможны любые перечисленные действия по результатам детального анализа НС.		+	$\lambda = \text{const}$	

Первоначальный рост низкочастотной составляющей суточной интенсивности отказов связан с приработкой изделия. Далее значение суточной интенсивности отказов уменьшается и достигает некоторого установившегося значения. Этап износа изделия приведенные зависимости не

охватывают. Низкочастотный тренд (кривая 2) характеризует «желаемую» для данного КА зависимость интенсивности отказов БА от номера отказа в условиях отсутствия воздействия факторов внешней среды и негативного развития НС. Анализ высокочастотной составляющей показывает, что в начале летной эксплуатации высока вероятность негативного развития НС на борту КА и возникновения зависимых отказов, что сопровождается увеличением интенсивности отказов на борту КА. С течением времени эксплуатации количество зависимых отказов БА КА уменьшается, а количество случайных отказов — возрастает.

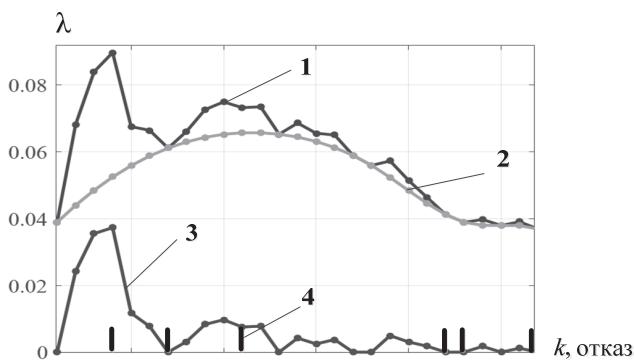


Рис. 1. Зависимости: суточной интенсивности отказов от номера отказа за время летной эксплуатации КА (кривая 1), низкочастотного тренда данной зависимости (кривая 2), высокочастотных изменений данной зависимости (кривая 3), участки, соответствующие «тяжелым отказам» (кривая 4)

На рисунке 2 приведены зависимости положительных (кривая 1) и отрицательных (кривая 2) приращений суточной интенсивности отказов БА за время летной эксплуатации КА, ступенчатой (кривая 3) и гладкой (кривая 4) аппроксимирующих функций этих зависимостей, а также участки, соответствующие «тяжелым» отказам (кривая 5). Из представленных данных видно, что приращения суточной интенсивности отказов могут быть положительными, отрицательными и близкими к нулю. Уровень положительных приращений суточной интенсивности отказов с течением времени уменьшается, причем, для зависимых отказов характерно уменьшение приращения $d\lambda$ от отказа к отказу. Подобное поведение закладывается на этапе проектирования КА с целью обеспечения их устойчивости к воздействию отказов БА. Средние значения положительных приращений суточной интенсивности отказов можно аппроксимировать ступенчатой или гладкой функцией (кривые 3 и 4). Зна-

чительные отрицательные приращения суточной интенсивности отказов коррелируют с интервалами времени нахождения КА в режиме неориентированного полета и взаимодействия с НКУ следующим образом: значение суточной интенсивности отказов в окрестности этих участков уменьшается до уровня низкочастотного тренда, иногда с небольшим запаздыванием. Особенно это характерно для этапа приработки КА. Последнюю зависимость совместно характеризуют кривая 4 на рисунке 1 и кривая 5 на рисунке 2.

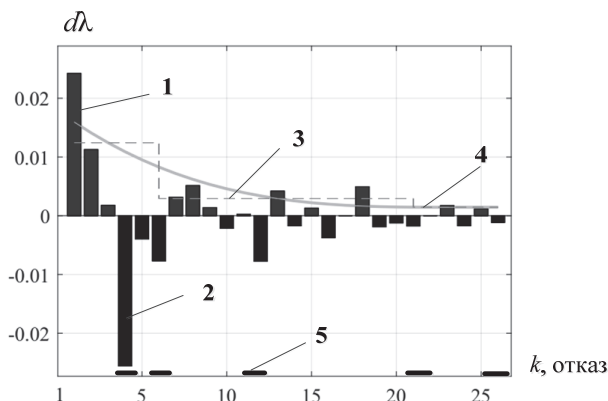


Рис. 2. Зависимости: положительных (кривая 1) и отрицательных (кривая 2) приращений суточной интенсивности отказов от номера отказа за время летной эксплуатации, ступенчатой (кривая 3) и гладкой (кривая 4) аппроксимирующих функций, а также участки, соответствующие «тяжелым отказам» (кривая 5)

Незначительные отрицательные, а также нулевые приращения интенсивности отказов (кривая 2), можно связать с работой бортовых средств диагностирования БА и восстановления ее работоспособного состояния при возникновении НС на борту КА.

Для рассмотренного примера математические зависимости, аппроксимирующие тренд $\lambda_{c,=}(k)$ (рисунок 1, кривая 2) и изменения значений положительных приращений суточной интенсивности отказов $d\lambda_{c,+}(k)$ (рисунок 2, кривая 4) на этапе приработки имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \lambda_{c,=}(k) &= 3,06 * 10^{-2} + 9 * 10^{-3} k - 1,3 * 10^{-3} k^2 + 1,5 * 10^{-4} k^3 - 10^{-5} k^4 + \\ &+ 3 * 10^{-7} k^5 - 3,3 * 10^{-9} k^6, \\ d\lambda_{c,+}(k) &= 1,8 * 10^{-2} - 2,1 * 10^{-3} k + 9 * 10^{-5} k^2 - 10^{-6} k^3, \quad k \in [1, 22], \end{aligned} \quad (1)$$

где k — номер отказа БА КА.

Для установившегося режима на этапе нормальной эксплуатации для оценки значений $\lambda_{c,=}(k)$ и $d\lambda_{c,+}(k)$ можно использовать следующие выражения:

$$\lambda_{c,=}(k) = 0.038, d\lambda_{c,+}(k) = 0.0013. \quad (2)$$

Выявленные закономерности, а также выражения (1) и (2) предлагается положить в основу модели развития отказов БА КА.

Анализ данных, представленных в таблицах 1 и 2, а также рассмотренных экспериментальных статистических данных об отказах БА КА, позволяет сделать вывод о более широких возможностях парирования НС бортовыми и наземными средствами СИТО и оказания тем самым влияния на параметры потока отказов БА при управлении КА с высоким уровнем автономности в сравнении с управлением КА с низким уровнем автономности. При этом задача диагностирования БА КА с высоким уровнем автономности в НКУ в целях профилактики по выходу из режима автономного функционирования или при отработке «тяжелых» отказов видится более сложной и имеющей большую степень неопределенности.

3. Формализация процесса диагностирования КА с высоким уровнем автономности функционирования. Согласно требованиям современных стандартов, средства контроля и диагностики сложных технических систем должны строиться на основе открытой модульной архитектуры и включать в свой состав модули (подсистемы) сбора информации, контроля и диагностирования ТС [19]. Модуль сбора информации обеспечивает сбор данных о параметрах технической системы, по которым проводится контроль ее ТС и диагностирование. Модуль контроля ТС осуществляет сравнение значений контролируемых параметров со значениями допусков и формирует сигнал оповещения при превышении соответствующих границ. Модуль диагностирования использует экспертные правила и вычислительные процедуры для определения текущего состояния диагностируемой системы и выявления возможных неисправностей [19].

В структуре СИТО автономный контроль ТС и диагностирование БА КА реализуется БКУ, использующим возможности бортовой информационно-телеметрической системы, датчиковой аппаратуры и встроенных средств контроля ТС [3]. Своевременно выявленные на борту КА неисправности могут быть устранены полностью или частично путем реализации процедур восстановления работоспособности БА, приведенных в таблице 2. При неблагоприятных условиях пропуски неисправностей и/или их недостоверное распознавание могут привести к увеличению интенсивности потока отказов, росту неопределенности значений параметров ТС, снижению достоверности контроля ТС и процедур поиска мест и

причин неисправностей [17]. Развитие технологий автономного диагностирования БА КА бортовыми средствами является одним из ключевых вопросов создания перспективных комплексов управления КА [20]. Однако с учетом того, что средства наземного сегмента СИТО обладают более широкими возможностями по решению задач диагностирования и управления ТС БА, чем бортовые средства, при создании КА с высоким уровнем автономности функционирования предусмотрено периодическое взаимодействие последних с НКУ с целью проведения углубленного анализа ТС БА. Положительный практический опыт реализации подобного контроля в целях профилактики НС на борту сложных аэрокосмических объектов имеется, например, за рубежом [21].

Рассмотрим организацию процесса диагностирования БА КА с высоким уровнем автономности функционирования [3]. На рисунке 3 представлена функциональная схема процесса диагностирования БА КА с высоким уровнем автономности с использованием наземных и бортовых средств СИТО.

Средства НКУ управляют ТС и целевым функционированием КА, а также входят в подсистему контроля ТС и диагностирования БА наземного сегмента СИТО. На схеме подробно выделены модули бортовой подсистемы контроля ТС и диагностирования БА бортового сегмента СИТО, принимаемые ими решения и результирующие состояния штатного и нештатного функционирования БА. Нештатные ситуации обнаруживаются в процессе контроля ТС БА. На практике при проведении контроля ТС БА существует необходимость не только в определении ее работоспособности, но и в соотнесении ее неработоспособного состояния к множеству известных НС [1]. Кроме того, в результате НС БА может оказаться в ЧРС. В соответствии с приведенной функциональной схемой процесса диагностирования БА КА бортовыми средствами контроля ТС и диагностирования БА непрерывно осуществляется решение следующих задач: 1) контроль ТС БА; 2) в случае принятия решения о НС функционирования БА — перевод КА в специальный режим работы, в котором риск развития негативных последствий отказов минимален; 3) распознавание НС функционирования БА и локализация неисправности; 4) восстановление работоспособного состояния БА.

Работу модуля контроля ТС БА характеризуют следующие три выходные реакции: правильное обнаружение НС, пропуск НС и ложное обнаружение НС. В последнем случае модулем контроля ТС принимается решение о НС, хотя БА КА находится в ЧРС. Еще одним возможным результатом контроля ТС является правильное необнаружение НС (правильное обнаружение ЧРС). Однако вероятностью этой выходной реакции можно пренебречь, что вызвано следующими причинами.

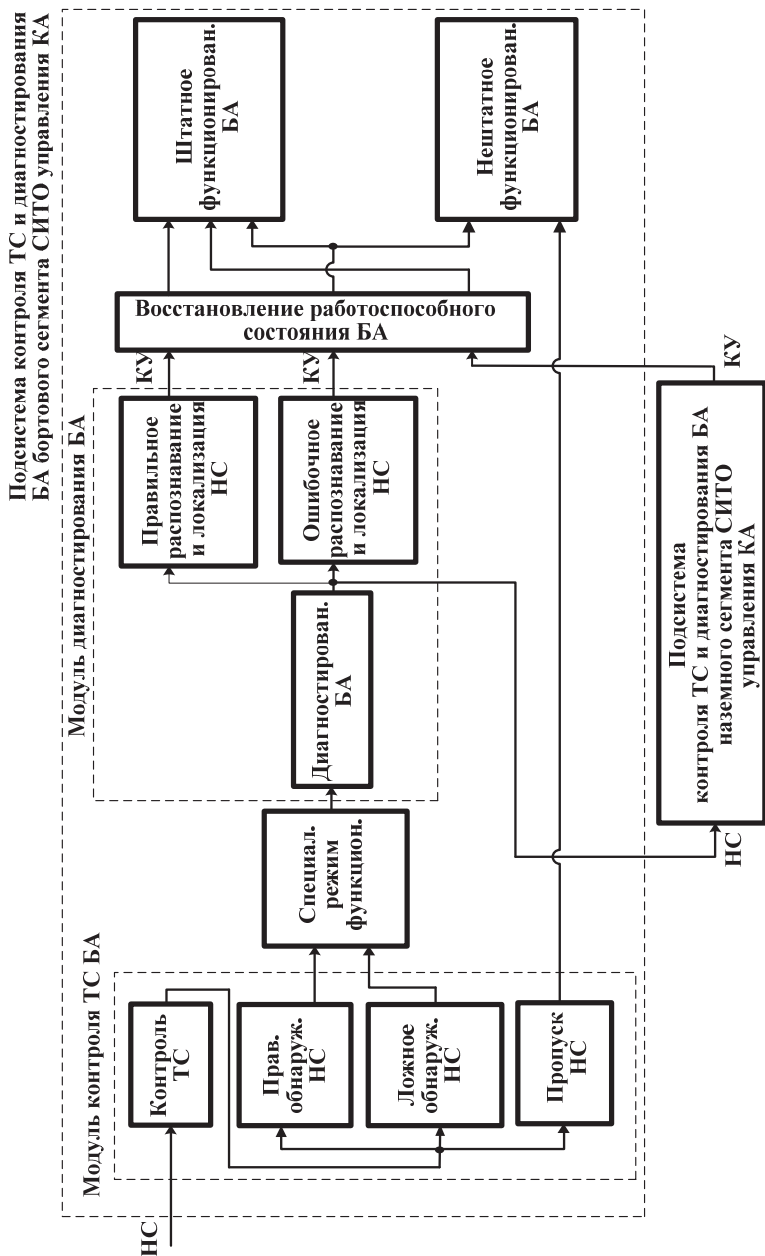


Рис. 3. Функциональная схема процесса диагностирования БА КА с высоким уровнем автономности функционирования

Во-первых, контролируемые параметры в ЧРС имеют значения, близкие к предельно допустимым, в гораздо большей степени соответствующие НС, чем работоспособному состоянию. Во-вторых, существенное пересечение множества ЧРС в пространстве контролируемых параметров между собой и по отношению к множеству НС не позволяют с высокой достоверностью решить задачу их оперативного обнаружения в модуле контроля ТС БА. При этом количество возможных ЧРС значительно больше, чем рассмотренных НС, что усугубляет проблему их обнаружения с заданной достоверностью. Как следствие, на модуль контроля ТС БА нецелесообразно возлагать функцию обнаружения ЧРС БА. В то же время частичная работоспособность БА или ошибка определения класса НС могут быть выявлены на этапе диагностирования, что требует учета выходной реакции ложного обнаружения НС, как это показано на функциональной схеме процесса диагностирования БА КА.

После решения задачи обнаружения НС начинается процесс диагностирования БА с использованием бортовых средств, в ходе которого осуществляется распознавание НС и локализация неисправности, а также оценка работоспособности БА в ЧРС. Работу модуля диагностирования БА характеризуют выходные реакции правильной или ошибочного распознавания и локализации НС. При невозможности решить задачи распознавания НС и восстановления работоспособного состояния БА бортовыми средствами, восстановление ее работоспособного состояния осуществляется после планового или инициируемого бортовыми средствами обращения к наземному сегменту СИТО. Такое обращение, как правило, происходит при обнаружении серьезных («тяжелых») отказов, вероятность возникновения которых гораздо ниже и для устранения которых возможностей бортовых средств диагностирования недостаточно. На практике количество таких «тяжелых» отказов часто соответствует правилу Парето и составляет порядка 20% от их общего количества [3]. Восстановление работоспособности БА средствами НКУ осуществляется путем выдачи различных управляющих воздействий — команд управления (КУ).

Функциональная схема на рисунке 3 отражает вопросы парирования не только аппаратных отказов, но и НС, обусловленных некорректной работой специального программного обеспечения, в том числе встроенного в БА КА. Следует отметить важную роль встроенных средств самодиагностики БА, позволяющих оценить ее ТС и сигнализировать как об аппаратных отказах, так и ошибках в работе специального программного обеспечения БА. При этом основную роль выполняет БКУ, осуществляющий парирование таких НС путем перезагрузки соответствующих модулей БА или всей системы из заданных «контрольных точек»,

соответствующих последнему работоспособному состоянию, а также путем переключения неисправных комплектов БА на резервные. Средства НКУ привлекаются в случае «тяжелых» ситуаций, связанных с ошибками, допущенными на этапе разработки программного обеспечения, как для переключения резервных комплектов БА, так и перезагрузки специального программного обеспечения на борту КА. Следует отметить, что в НКУ сообщения об аппаратных отказах и ошибках в работе программного обеспечения, в том числе встроенного в БА, рассматриваются как единый поток НС, так как результатом таких НС является неработоспособное состояние БА. При этом рассмотренная на рисунке 3 функциональная схема направлена как на повышение отказоустойчивости аппаратной части, так и повышение надежности специального программного обеспечения БА КА. Основное отличие данной функциональной схемы для КА с низким уровнем автономности будет заключаться в отсутствии бортового сегмента СИТО управления КА и перераспределении функций контроля ТС и диагностирования БА КА на средства НКУ.

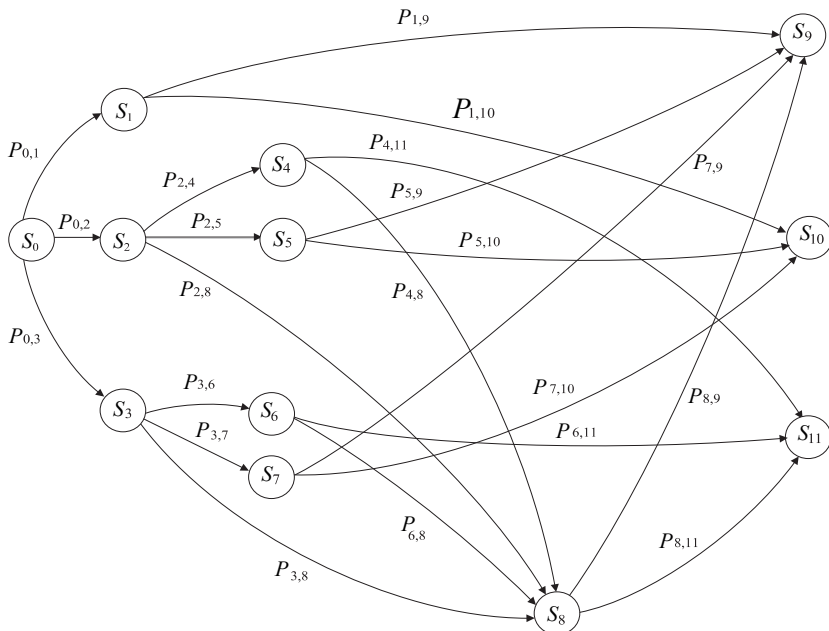


Рис. 4. Граф состояний процесса диагностирования БА КА с высоким уровнем автономности функционирования

Функциональной схеме процесса диагностирования БА КА с высоким уровнем автономности, приведенной на рисунке 3, соответствует граф состояний, представленный на рисунке 4. Число текущих состояний графа, образующих множество $S=(S_0, S_1, S_2, \dots, S_{11})$, определяется логикой и уровнем описания процесса диагностирования БА КА при возникновении НС. Интенсивности переходов между состояниями определяются вероятностными и временными характеристиками соответствующих процессов контроля ТС и диагностирования БА КА.

Исходным состоянием графа является состояние S_0 , соответствующее воздействию НС на БА КА, находящуюся в работоспособном состоянии, ТС которой контролируется бортовой подсистемой контроля ТС и диагностирования БА.

Работу бортовой подсистемы контроля ТС и диагностирования БА характеризуют следующие текущие состояния:

S_1 — контроль ТС системы проведен, имеет место пропуск НС;

S_2 — контроль ТС проведен, НС правильно обнаружена, осуществляется переход в специальный режим работы и распознавание правильно обнаруженной НС;

S_3 — контроль ТС проведен, имеет место ложное обнаружение НС, осуществляется переход в специальный режим работы и распознавание ложно обнаруженной НС;

S_4 — НС правильно обнаружена, в результате диагностирования распознавание НС выполнено правильно, реализуется правильная процедура восстановления работоспособности БА;

S_5 — НС правильно обнаружена, в результате диагностирования распознавание НС выполнено неправильно, реализуется неправильная процедура восстановления работоспособности БА;

S_6 — имеет место ложное обнаружение НС, но в результате диагностирования распознавание НС выполнено правильно, реализуется правильная процедура восстановления работоспособности БА;

S_7 — имеет место ложное обнаружение НС, в результате диагностирования распознавание НС выполнено неправильно, реализуется неправильная процедура восстановления работоспособности БА.

Работу подсистемы контроля ТС и диагностирования БА наземного сегмента СИТО характеризует состояние S_8 , соответствующее обращению КА к НКУ после правильного или ложного обнаружения НС и выполнению контроля ТС и диагностированию БА средствами наземного сегмента СИТО.

Состояния S_9, S_{10}, S_{11} являются поглощающими и характеризуют следующие состояния БА КА:

S_9 — БА КА находится в неработоспособном состоянии вследствие пропуска НС и невыполнения бортовыми средствами и средствами наземного сегмента СИТО процедур восстановления работоспособного состояния БА;

S_{10} — БА КА находится в ЧРС и способна выполнять задачи по функциональному предназначению с ограничениями вследствие некорректности НС к правильности выполнения бортовыми средствами процедур восстановления работоспособности БА;

S_{11} — БА КА находится в работоспособном состоянии благодаря работе бортовых и наземных средств диагностирования и выполнению после обнаружения НС правильных процедур восстановления работоспособного состояния БА.

Полагается, что наземный сегмент СИТО, обладающий более широкими функциональными возможностями диагностирования, чем бортовая подсистема контроля ТС и диагностирования БА, при правильном обнаружении НС осуществляет локализацию неисправности и восстановление работоспособного состояния БА в результате формирования соответствующих КУ. Если же НС не обнаружена средствами диагностирования наземного сегмента СИТО, то возможность восстановления работоспособного состояния БА КА отсутствует.

Переходы между состояниями описываются вероятностями $P_{q,r}$ перехода из текущего состояния q в состояние r . Вероятности $P_{q,r}$ образуют матрицу вероятностей переходов \mathbf{P} : $P_{q,r} \in \mathbf{P}$. В рассматриваемом случае матрица \mathbf{P} имеет размерность 11×9 . Нулевые значения элементов матрицы \mathbf{P} соответствуют отсутствию переходов между соответствующими состояниями. Для графа состояний, приведенного на рисунке 4, $q = 0 \dots 8, r = 1 \dots 11$, матрица переходов имеет следующий вид:

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} P_{0,1} & P_{0,2} & P_{0,3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{1,9} & P_{1,10} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & P_{2,4} & P_{2,5} & 0 & 0 & P_{2,8} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{3,6} & P_{3,7} & P_{3,8} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{4,8} & 0 & 0 & P_{4,11} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{5,9} & P_{5,10} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{6,8} & 0 & 0 & P_{6,11} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{7,9} & P_{7,10} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{8,9} & 0 & P_{8,11} \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Все указанные вероятности можно свести в 4 группы, характеризующие уровни обработки диагностической информации о НС. Первый уровень отвечает за оперативный контроль ТС БА КА с использованием бортовых средств и характеризуется вероятностями:

$P_{0,1}$ — пропуска НС; $P_{0,2}$ — правильного обнаружения НС; $P_{0,3}$ — ложного обнаружения НС. Второй уровень отвечает за распознавание НС в БА КА и локализацию неисправности с использованием бортовых средств диагностирования и характеризуется вероятностями: $P_{2,4}$ — правильного распознавания и локализации неисправности после правильного обнаружения НС; $P_{2,5}$ — ошибочного распознавания и локализации неисправности после правильного обнаружения НС; $P_{3,6}$ — правильного распознавания и локализации неисправности после ложного обнаружения НС; $P_{3,7}$ — ошибочного распознавания и локализации неисправности после ложного обнаружения НС; $P_{2,8}$, $P_{3,8}$ — обращения к наземному сегменту СИТО после правильного или ложного обнаружения НС соответственно при наличии значительной неопределенности в значениях контролируемых параметров, не позволяющей задействовать бортовые средства диагностирования БА КА. Третий уровень отвечает за восстановление работоспособности БА КА и характеризуется вероятностями: $P_{1,9}$, $P_{1,10}$ — перехода БА в неработоспособное состояние и ЧРС соответственно в результате пропуска НС; $P_{4,11}$, $P_{6,11}$ — восстановления работоспособности БА с использованием бортовых средств диагностирования после правильного или ложного обнаружения НС соответственно; $P_{4,8}$, $P_{6,8}$ — обращения к наземному сегменту СИТО после правильного или ложного обнаружения НС соответственно, вследствие невозможности восстановить работоспособность БА бортовыми средствами (случай «тяжелых» отказов); $P_{5,9}$, $P_{7,9}$ — перехода БА в неработоспособное состояние вследствие неправильного диагностирования НС и реализации неправильных процедур восстановления работоспособности БА после правильного или ложного обнаружения НС соответственно; $P_{5,10}$, $P_{7,10}$ — перехода БА в ЧРС после неправильного диагностирования НС и реализации неправильных процедур восстановления работоспособности БА вследствие не критичности НС к правильности выполнения бортовыми средствами процедур восстановления работоспособности БА после правильного или ложного обнаружения НС соответственно. Четвертый уровень отвечает за контроль ТС БА с использованием наземного сегмента СИТО и характеризуется вероятностями: $P_{8,9}$ — не обнаружения НС в БА при углубленном анализе ее ТС средствами наземного сегмента СИТО; $P_{8,11}$ — 90-5+ — правильного обнаружения НС и диагностирования БА при углубленном анализе ее ТС средствами наземного сегмента СИТО.

На основе принятых допущений о характере ЧРС БА можно полагать, что вероятность правильного распознавания и локализации неисправности после ложного обнаружения НС $P_{3,6}$ меньше, чем вероятность правильного распознавания и локализации неисправности после правильного обнаружения НС $P_{2,4}$: $P_{3,6} < P_{2,4}$. Также можно полагать, что при пропуске НС, ложном обнаружении НС, ошибочном распознавании и локализации неисправностей вероятность перехода системы в неработоспособное состояние выше, чем в ЧРС: $P_{1,10} < P_{1,9}$, $P_{5,10} < P_{5,9}$, $P_{7,10} < P_{7,9}$. Вероятности переходов для всех состояний, кроме поглощающих, образуют полную группу событий: $P_{0,1} + P_{0,2} + P_{0,3} = 1$, $P_{1,9} + P_{1,10} = 1$, $P_{2,4} + P_{2,5} + P_{2,8} = 1$, $P_{3,6} + P_{3,7} + P_{3,8} = 1$, $P_{4,8} + P_{4,11} = 1$, $P_{5,9} + P_{5,10} = 1$, $P_{6,8} + P_{6,11} = 1$, $P_{7,9} + P_{7,10} = 1$, $P_{8,9} + P_{8,11} = 1$. В исходном состоянии вероятности $P_{0,2}$, $P_{2,4}$ и $P_{3,6}$ имеют заданные значения. Произведение вероятностей $P_{0,2}$ и $P_{2,4}$ может быть использовано в качестве показателя достоверности бортовой подсистемы контроля ТС и диагностирования БА КА: $D_1 = P_{0,2} P_{2,4}$. Вероятность $P_{8,11}$ может быть использована в качестве показателя достоверности средств контроля ТС и диагностирования БА наземного сегмента СИТО управления КА: $D_2 = P_{8,11}$. Результирующая вероятность P_{11} попадания системы в поглощающее состояние S_{11} , соответствующее работоспособному состоянию и штатному функционированию БА КА после выполнения цикла процедур контроля ТС, диагностирования и восстановления работоспособности БА КА, зависит как от значений показателей достоверности D_1 и D_2 , так и от значений других вероятностей, описывающих переходы в рассматриваемом графе состояний.

Трудность разделения переменных и получения аналитической зависимости вероятности работоспособного состояния БА КА от показателей достоверности внутреннего и внешнего диагностирования $P_{11}(D_1, D_2)$ приводит к необходимости использования методов имитационного моделирования для исследования процессов диагностирования БА КА.

На основе графа состояний, приведенного на рисунке 4, была разработана имитационная дискретно-событийная модель процесса диагностирования БА КА с высоким уровнем автономности. Модель реализована в среде AnyLogic [6]. Основная причина, по которой выбран данный отечественный программный продукт, заключается в том, что AnyLogic обладает расширенными возможностями в области объектно-ориентированного программирования и позволяет разработчику, по сути, создать собственную среду моделирования для заданной предметной области, а также дает возможность совмещать различные подходы к моделированию.

На вход модели поступает поток заявок, имитирующих НС, которые порождают различные события, распространяющиеся в модели от со-

стояния к состоянию. В начальный момент времени БА находится в состоянии S_0 . В последующие моменты времени БА подвергается воздействию имитируемых НС, возникающих с интенсивностью λ_0 . Каждая НС порождает распространяющуюся в модели заявку на обработку НС бортовыми средствами контроля ТС и диагностирования БА. В результате обработки этой заявки система попадает в одно из поглощающих состояний S_9 , S_{10} или S_{11} . Интервал автономного функционирования КА является случайной величиной и определяется как интервал времени между событиями обращения к наземному сегменту СИТО. Все процессы в модели синхронизированы, а их длительность определяется модельным временем. При переходах из текущего состояния q в состояние r происходит задержка модельного времени на величину $T_{q,r}$. Задержки $T_{q,r}$ образуют матрицу задержек \mathbf{T} , $T_{q,r} \in \mathbf{T}$. Для графа состояний, приведенного на рисунке 4, $q = 0 \dots 8$, $r = 1 \dots 11$, матрица задержек имеет следующий вид:

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} T_{0,1} & T_{0,2} & T_{0,3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & T_{1,9} & T_{1,10} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & T_{2,4} & T_{2,5} & 0 & 0 & T_{2,8} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & T_{3,6} & T_{3,7} & T_{3,8} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & T_{4,8} & 0 & 0 & T_{4,11} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & T_{5,9} & T_{5,10} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & T_{6,8} & 0 & 0 & T_{6,11} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & T_{7,9} & T_{7,10} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & T_{8,9} & 0 & T_{8,11} \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Матрица \mathbf{T} имеет такую же размерность и структуру, как и матрица \mathbf{P} . Нулевые значения элементов матрицы \mathbf{T} соответствуют отсутствию переходов между соответствующими состояниями, а нулевая длительность переходов между состояниями исключается.

Несмотря на достаточно общее определение параметров модели $T_{q,r}$ и $P_{q,r}$, все они сводятся к конкретным техническим характеристикам и сведениям из нормативных документов. Например, параметры бортового сегмента рассмотренной функциональной схемы — бортового диагностического комплекса — достаточно точно определяются при проектировании КА, приводятся в документации на КА и при необходимости уточняются по результатам наземных автономных и комплексных испытаний бортовых систем, летных испытаний и летной эксплуатации КА, при моделировании НС на стенде Главного конструктора КА. Возможные неточности в определении некоторых параметров $T_{q,r}$ нивелируются их незначительным вкладом в конечный результат и возможностью среды моделирования AnyLogic задавать интервальные оценки значений $T_{q,r}$ с использованием различных законов распределения. Следует отметить, что

показатели достоверности контроля ТС и диагностирования БА бортовым D_1 и наземным D_2 сегментами СИТО, которые оказывают наибольшее влияние на конечный результат, при моделировании не являются константами, а варьируются в широком диапазоне значений с целью получения выходных зависимостей.

В модель включен набор правил, в соответствии с которыми происходят изменения характеристик потока отказов за счет программного изменения параметров соответствующего компонента имитационной модели (источника заявок) во времени. Обычно данный набор правил, в соответствии с известными методами FTA и FMEA, связывается с деревом отказов объекта диагностирования, в рассматриваемом случае – БА КА [22-24]. В нашем случае набор этих правил привязывается к графу состояний, представленному на рисунке 4. В начальный момент времени значение интенсивности отказов принимает значение $\lambda(1)=\lambda_{c,=(1)}$ в соответствии с выражением (1) или (2) для $k=1$, а значения параметров системы диагностирования — согласно техническому описанию. Далее, в зависимости от направления распространения заявки в модели, осуществляется изменение интенсивности отказов следующим образом:

$$\lambda(k+1) = \begin{cases} \lambda(k) + d\lambda_{c,+}(k), S_0 \rightarrow S_9, S_{10}, d\lambda_{c,+}(k) = \varphi(k), \\ \lambda(k), S_0 \rightarrow S_{11}, \\ \lambda_{c,=(k)}, S_8 \rightarrow S_{11}, \lambda_{c,=(k)} = f(k), \end{cases} \quad (5)$$

где $d\lambda_{c,+}(k)$, $\lambda_{c,=(k)}$, $\varphi(k)$, $f(k)$ — параметры и функции, определяемые в соответствии с (1) или (2), в зависимости от этапа эксплуатации (приработки или нормальной эксплуатации БА КА); k — номер НС (заявки в графе). При этом необходимо учитывать, что на этапе приработки БА КА $k \in [1, 22]$.

При достижении состояния S_8 фиксируется время обращения к наземному сегменту СИТО $t_B(j)$ и вычисляется время автономного функционирования КА $T_A(j)$:

$$T_A(j) = t_B(j) - t_B(j-1) - T_D(j), \quad (6)$$

где $t_B(j)$, $t_B(j-1)$ — модельное время двух последовательных обращений к наземному сегменту СИТО, $T_D(j)$ — время диагностирования БА КА средству наземного сегмента СИТО, j — номер обращения. При таком определении величина $T_A(j)$ представляет собой интервал времени между j -ым и $(j-1)$ -ым обращениями к наземному сегменту СИТО. Величина $T_D(j)$ определяется следующим образом: $T_D(j)=T_{8,11}(j)$ при пра-

вильном обнаружении НС и восстановлении работоспособного состояния БА, $T_d(j)=T_{8,9}(j)$ при не обнаружении НС и невозможности восстановления работоспособного состояния БА.

Выявление зависимости интервала автономного функционирования КА от параметров модели осуществляется по ансамблю реализаций, полученных в результате имитационного моделирования. Накопив статистику значений величины $T_A(j)$ по результатам множества экспериментов, можно построить функцию плотности вероятности ее распределения и оценить значение интервала автономного функционирования КА \hat{T}_A , гарантированно достигаемого с заданной вероятностью P_A :

$$\hat{T}_A \left(P(T_A(j) \geq \hat{T}_A) = P_A \right), \quad (7)$$

а также получить зависимости этой величины от параметров модели. В данном случае, вероятность P_A — вероятность того, что на интервале времени от 0 до \hat{T}_A не произойдет «тяжелых» НС и задействования средств НКУ для диагностирования и восстановления работоспособности БА.

В предложенной модели существует возможность калибровки ее параметров на основе сравнения статистических характеристик полученного модельного потока отказов со статистическими характеристиками реального потока отказов, как на борту исследуемого КА, так и на борту однотипных КА. Для верификации модели можно использовать доверительный интервал, полученный с заданной доверительной вероятностью на значения \hat{T}_A , характерные для выборки современных КА.

Представленная модель обладает оригинальностью и новизной в части совмещения дискретно-событийной имитационной модели процесса диагностирования БА и аналитической модели развития НС на борту КА с высоким уровнем автономности.

4. Результаты имитационного моделирования процесса диагностирования бортовой аппаратуры космического аппарата. Имитационное моделирование процесса диагностирования БА проводилось для исходных данных, соответствующих эксплуатационно-техническим характеристикам КА дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) «Ресурс-ДК1» [3]. Задавалась суточная интенсивность возникновения отказов и параметры бортовых модулей контроля ТС и диагностирования БА $P_{0,2}$, $P_{2,4}$, $P_{8,11}$. На входе модели было сформировано более 40000 событий — НС (неисправностей), время между которыми было распределено по экспоненциальному закону. Первоначально рассматривался этап приработки БА КА.

При этом изменение интенсивности отказов осуществлялось в соответствии с моделью (5) и выражением (1). По полученным в результате имитационного моделирования реализациям $T_A(j)$ определялся интервал автономного функционирования КА \hat{T}_A в соответствии с (7). На рисунке 5 представлены построенные по ансамблю реализаций и сглаженные графики зависимостей интервала автономного функционирования КА \hat{T}_A от достоверности автономного диагностирования БА D_1 . Зависимости $\hat{T}_A(D_1)$ соответствуют оценке интервала автономного функционирования с вероятностью достижения $P_A=0.95$ и различной достоверности внешнего диагностирования. Кривая 1 соответствует высокой достоверности внешнего диагностирования ($D_2=1$), кривая 2 — средней достоверности внешнего диагностирования ($D_2=0.75$), кривая 3 — условиям, когда внешнее диагностирование не осуществляется ($D_2=0.1$).

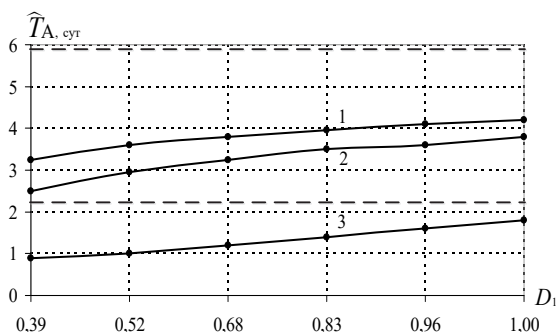


Рис. 5. Зависимости интервала автономного функционирования КА от достоверности автономного диагностирования на этапе приработки БА при различной достоверности внешнего диагностирования

Аналогичные исследования проводились для этапа нормальной эксплуатации КА. При этом изменение интенсивности отказов осуществлялось в соответствии с моделью (5) и выражением (2). На рисунке 6 представлены зависимости, полученные для двух случаев: этапа нормальной эксплуатации (кривая 1) и этапа приработки БА КА (кривая 2). Зависимости $\hat{T}_A(D_1)$ соответствуют оценке интервала автономного функционирования с вероятностью достижения $P_A=0.95$ при высокой достоверности внешнего диагностирования ($D_2=1$). При больших значениях D_2 полученные зависимости аппроксимируются степенным, а при малых значениях D_2 — экспоненциальным законом.

На рисунках 5 и 6 пунктиром отмечен диапазон значений \hat{T}_A , использованный для верификации модели. Очевидно, что кривая 3 на рисунке 5 не попадает в данный диапазон, так как соответствует маловероятной ситуации.

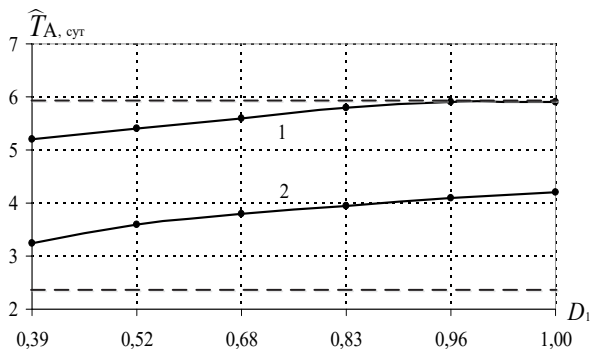


Рис. 6. Зависимости интервала автономного функционирования КА от достоверности автономного диагностирования на различных этапах эксплуатации при фиксированной достоверности внешнего диагностирования

С увеличением показателя достоверности автономного диагностирования с использованием бортовых средств $D_1=P_{0,2}P_{2,4}$, эффект накопления последствий отказов БА проявляется в меньшей степени, что позволяет увеличить интервал автономного функционирования КА. При этом на этапе приработки БА контроль ТС с использованием средств наземного сегмента СИТО необходимо осуществлять чаще, чем на этапе нормальной эксплуатации. Представленные результаты и разработанная имитационная модель могут иметь практическое значение для планирования внешнего контроля ТС БА КА с использованием средств наземного сегмента СИТО и определения начального значения периодичности проведения углубленного анализа ТС БА, которое может корректироваться на этапе летной эксплуатации КА в зависимости от количества «тяжелых» отказов на борту.

В работе [14] получена зависимость, аппроксимирующая значение уровня автономности функционирования КА ДЗЗ в соответствии с пятибальной классификационной шкалой NASA:

$$A = \left(\frac{C_y}{C_n} \right)^{-0.0657} \left(\frac{t_y}{\hat{T}_A} \right)^{-0.0842}, \quad (8)$$

где C_y — пропускная способность канала связи с НКУ; C_n — пропускная способность канала передачи специальной информации; t_y — время, затраченное на управление КА средствами НКУ в течение выполнения целевых задач. Используя зависимости, представленные на рисунке 5, а также характеристики каналов передачи информации для КА «Ресурс-ДК1», определим влияние показателей D_1 и D_2 на уровень автономности КА. Результаты анализа представлены на рисунке 7 в виде зависимостей уровня автономности A от показателя достоверности D_1 бортового сегмента СИТО при различных значениях D_2 . Кривая 1 соответствует высокой достоверности внешнего диагностирования ($D_2=1$), кривая 2 — средней достоверности внешнего диагностирования ($D_2=0.75$), кривая 3 — условиям, когда внешнее диагностирование не осуществляется ($D_2=0.1$).

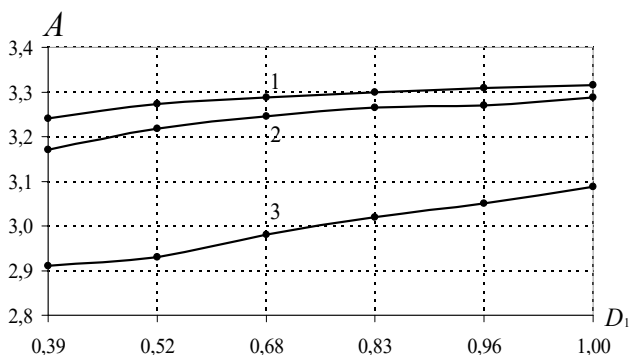


Рис. 7. Зависимости уровня автономности КА от достоверности автономного диагностирования ТС на этапе приработки при различной достоверности внешнего диагностирования

Данные зависимости позволяют сделать вывод о влиянии характеристик средств диагностирования СИТО на уровень автономности КА и его изменение в пределах 8% пятибальной шкалы уровня автоматизации аэрокосмических средств по классификации NASA. Полученная величина приобретает значимый вес на фоне изменений уровня автономности КА двух последующих друг за другом поколений, приближенно равных 10–24% этой же шкалы [14].

5. Заключение. Повышение уровня автономности является в настоящее время актуальной задачей при создании перспективных КА различного назначения (не только КА ДЗЗ), о чем свидетельствует экспоненциальный рост уровня автономности аэрокосмических средств, наблюдаемый в последние десятилетия как у нас в стране, так и за рубежом [14]. Одним из способов достижения высокой автономности

функционирования КА является повышение отказоустойчивости БА. В реальных условиях функционирования БА КА пропуски отказов и ошибки распознавания неисправностей при низкой достоверности автономного диагностирования могут привести к росту интенсивности отказов, эффекту накопления последствий неисправностей и отказов в БА, а также сокращению интервала автономного функционирования КА. Это утверждение относится к широкому классу сложных технических систем с высоким уровнем автономности. Для снижения последствий такого развития ситуации необходимо повышать достоверность бортовых (автономных) средств диагностирования и периодически проводить углубленный анализ ТС КА с использованием средств диагностирования наземного сегмента СИТО. Представленные результаты качественно подтверждают данное утверждение, а рассмотренный в статье подход может быть использован как для определения значений системных показателей КА с высоким уровнем автономности функционирования, так и для обоснования требований, предъявляемых к средствам контроля ТС и диагностирования БА.

Литература

1. *Соловьёв В.А., Лысенко Л.Н., Любинский В.Е.* Управление космическими полетами. Ч.1 // М.: Издательство МГТУ имени Н. Э. Баумана. 2009. 476 с.
2. *Малкин В.С.* Техническая диагностика // М.: Академия. 2013. 272 с.
3. *Кириллин А.Н., Ахметов Р.Н., Сологуб А.Н., Макаров В.П.* Методы обеспечения живучести низкоорбитальных автоматических КА зондирования Земли: математические модели, компьютерные технологии // М.: Машиностроение. 2010. 384 с.
4. *Ахметов Р.Н., Макаров В.П., Сологуб А.Н.* Концепция автономного управления живучестью автоматических космических аппаратов дистанционного зондирования Земли в аномальных ситуациях // Известия Самарского центра Российской академии наук. 2009. Том 11. № 3. С. 165–176.
5. *Мальцев Г.Н., Назаров А.В., Якимов В.Л.* Имитационное моделирование процесса диагностирования сложной технической системы с высоким уровнем автономности функционирования // Информационно-управляющие системы. 2016. № 4. С. 34–43.
6. *Borshchev A.* The Big Book of Simulation Modeling: Multimethod Modeling with AnyLogic 6 // AnyLogic North America. 2013. 612 p.
7. *Охтилев М.Ю., Мустафин Н.Г., Миллер В.Е., Соколов Б.В.* Концепция проактивного управления сложными объектами: теоретические и технологические основы // Известия вузов. Приборостроение. 2014. № 11(57). С. 7–15.
8. *Мостовой Я.А.* Имитационная математическая модель внешней среды в жизненном цикле бортового программного обеспечения управления космической платформой // Компьютерная оптика. 2012. № 3(36). С. 412–418.
9. *Назаров А.В.* Метод структурно-параметрической адаптации многоуровневых систем обработки информации с использованием локальных функционалов качества // Информационно-управляющие системы. 2014. № 5. С. 25–33.
10. *Кириллин А.Н. и др.* Влияние надежности бортовых систем космических аппаратов ДЗЗ на показатели периодичности съемки // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2013. № 4(42). С. 170–180.
11. *Лохматкин В.В., Куренков В.И.* Прогнозирование производительности съемки космических аппаратов дистанционного зондирования Земли с учетом надежности бортовых систем // Известия Самарского центра Российской академии наук. 2013. Том 15. №4(2). С. 465–472.

12. *Абрамешин А.Е., Жаднов В.В.* Моделирование интенсивности отказов интегральных схем бортовой космической аппаратуры из-за воздействия электростатических разрядов // Технологии ЭМС. 2014. № 2(49). С. 27–34.
13. *Мозгалецкий А.В., Койда А.Н.* Вопросы проектирования систем диагностирования // Л.: Энергоатомиздат. 1985. 112 с.
14. *Мальцев Г.Н., Якимов В.Л.* Современные подходы к определению уровня автономности космических аппаратов // Информационно-управляющие системы. 2017. № 2. С. 34–43.
15. ГОСТ Р 56526–2015. Требования надежности и безопасности космических систем, комплексов и автоматических космических аппаратов единичного (мелкосерийного) изготовления с длительными сроками активного существования // М.: Стандартинформ. 2015. 46 с.
16. *Лобан А.В.* Информационная технология распределенного диагностирования космических аппаратов // Москва–Берлин: Директ-Медиа. 2015. 146 с.
17. *Ларин В.П., Шелест Д.К.* Формирование информационного обеспечения надежности бортовой аппаратуры на стадии проектирования // Информационно-управляющие системы. 2012. № 4. С. 93–97.
18. ГОСТ 27.310–95. Анализ видов, последствий и критичности отказов. Основные положения // М.: Издательство стандартов. 2001. 23 с.
19. *Талалаев А.А., Фраленко В.П., Хачумов В.М.* Обзор стандартов и концепция построения средств мониторинга, контроля и диагностики космического аппарата // Программные системы: теория и приложения. 2015. № 3. С. 21–43.
20. *Мальцев Г.Н., Стогов Г.В., Терехов А.В.* Перспективы создания комплексов управления космическими аппаратами на базе ключевых технологий // Информационно-управляющие системы. 2006. № 5. С. 2–5.
21. *Меньшиков В.А.* Полигонные испытания. Ч.II // М.: КОСМО. 1999. 237 с.
22. *Jenab K., Pineau J.* Failure mode and effect analysis on safety critical components of space travel // Management Science Letters. 2015. vol. 5. pp. 669–678.
23. *Baig A., Ruzli R., Buang A.* Reliability analysis using fault tree analysis: a review // International Journal of Chemical Engineering and Applications. 2013. vol. 4. no. 3. pp. 169–173.
24. *Takahashi M., Kosaka R., Nanba R.* A Study of Fault Tree Analysis for Control Program in Space System // Proc. of 2015 IEEE/SICE International Symposium on System Integration. 2015. pp. 301–306.

Мальцев Георгий Николаевич — д-р техн. наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, действительный член Академии космонавтики имени К.Э.Циолковского, профессор кафедры космических радиотехнических систем, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского (ВКА им. А.Ф. Можайского). Область научных интересов: обработка сигналов в радиотехнических и оптико-электронных информационных системах, космические радиотехнические комплексы управления, сбора и передачи информации. Число научных публикаций — 250. georgy_maltsev@mail.ru; ул. Ждановская, 13, Санкт-Петербург, 197198; р.т.: +7(812)347-95-32.

Назаров Андрей Вячеславович — д-р техн. наук, доцент, начальник кафедры космической радиолокации и радионавигации, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского (ВКА им. А.Ф. Можайского). Область научных интересов: распознавание образов, нейросетевые технологии, моделирование распределенных систем, обработка сигналов в оптико-электронных информационных системах. Число научных публикаций — 100. naz-av@mail.ru; ул. Ждановская, 13, Санкт-Петербург, 197198; р.т.: +7(812)347-95-33.

Якимов Виктор Леонидович — к-т техн. наук, доцент, докторант, Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (ВКА им. А.Ф. Можайского). Область научных интересов: моделирование сложных систем, нейросетевые технологии, техническая диагностика. Число научных публикаций — 40. yakim78@yandex.ru; ул. Ждановская, 13, Санкт-Петербург, 197198; р.т.: +7(812)347-95-36.

G.N. MALTSEV, A.V. NAZAROV, V.L. YAKIMOV
**THE STUDY OF THE DIAGNOSING OF AUTOMATIC
 SPACECRAFT ON-BOARD EQUIPMENT USING A DISCRETE-
 EVENT SIMULATION MODEL**

Maltsev G.N., Nazarov A.V., Yakimov V.L. The Study of the Diagnosing of Automatic Spacecraft on-Board Equipment Using a Discrete-Event Simulation Model.

Abstract. Features of functioning of spacecraft with a high level of autonomy as objects of technical diagnosis are considered. It is assumed that on-board monitoring and diagnostic functions are autonomous and refer to ground facilities when it is impossible to solve problems of recognition of abnormal situations and restore the operational state of on-board equipment. Diagnosing of on-board equipment is described using a state graph that takes into account the peculiarities of the abnormal situations detection by airborne and ground-based means. The developed simulation model allows taking into account the accumulation of consequences of onboard equipment failures due to the influence of the environmental factors of near space and the change in the intensity of their occurrence. The results of simulation modeling of spacecraft diagnosing by means of on-board and terrestrial means of the information telemetry system are presented. The importance of a terrestrial segment of the information telemetry system for the spacecraft control during the periodical and in-depth analysis of their technical condition is shown. The impact of reliability of onboard equipment diagnosis on the autonomy level of Earth remote sensing spacecraft by the simulation results is analyzed.

Keywords: spacecraft, autonomous functioning, on-board equipment, technical state, diagnosis.

Maltsev Georgy Nikolaevich — Ph.D., Dr. Sci., professor, honored scientist of the Russian Federation, full member of the Tseolkovsky academy of cosmonautics, professor of the space radio engineering systems department, Mozhaisky Military Space Academy. Research interests: processing of signals in radio engineering and optico-electronic information systems, space radio-technical complexes for control, collection and transmission of information. The number of publications — 250. georgy_maltsev@mail.ru; 13, Zhdanovskaya street, St.-Petersburg, 197198, Russia; office phone: +7(812)347-95-32.

Nazarov Andrey Vyacheslavovich — Ph.D., Dr. Sci., associate professor, head of space radiolocation and a radio navigation department, Mozhaisky Military Space Academy. Research interests: pattern recognition, neural nets, modeling of distributed systems, signal processing in optical-electronic information systems. The number of publications — 100. naz-av@mail.ru; 13, Zhdanovskaya street, St.-Petersburg, 197198, Russia; office phone: +7(812) 347-95-33.

Yakimov Victor Leonidovich — Ph.D., associate professor, doctoral student, Mozhaisky Military Space Academy. Research interests: simulation of difficult systems, neural network technologies, technical diagnostics. The number of publications — 40. yakim78@yandex.ru; 13, Zhdanovskaya street, St.-Petersburg, 197198, Russia; office phone: +7(812)347-95-36.

References

1. Solov'ev V.A., Lysenko L.N., Liubinskii V.E. *Upravlenie kosmicheskimi poletami. Ch.II* [Mission control. Part. 1]. Moscow: MGTU imeni N. E. Baumana Publ. 2009. 476 p. (In Russ.).
2. Malkin V.S. *Tekhnicheskaja diagnostika* [Technical diagnostics]. Moscow: Akademiia Publ. 2013. 272 p. (In Russ.).
3. Kirilin A.N., Akhmetov R.N., Sologub A.N., Makarov V.P. *Metody obespecheniia*

zhivuchesti nizkoorbital'nykh avtomaticheskikh KA zondirovaniia Zemli: matematicheskie modeli, komp'iuternye tekhnologii [Methods to ensure the survivability of low-orbit spacecraft sensing of the Earth: mathematical models, computer technology]. Moscow: Mashinostroenie Publ. 2010. 384 p. (In Russ.).

4. Akhmetov R.N., Makarov V.P., Sologub A.N. [The concept of automatic space vehicles survivability autonomous control for Earth remote sensing in anomalous situations]. *Vestnik Samarskogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk – Bulletin of the Samara state aerospace university*. 2009. vol. 11. no. 3. pp. 165–176. (In Russ.).
5. Maltsev G.N., Nazarov A.V., Yakimov V.L. [The simulation modeling of complex technical system diagnosing process with autonomy high level of functioning]. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy – Information and control systems*. 2016. vol. 4. pp. 34–43. (In Russ.).
6. Borshchev A. The big book of simulation modeling: multimethod modeling with AnyLogic 6. AnyLogic North America. 2013. 612 p.
7. Okhtilev M.Yu., Mustafin N.G., Miller V.E., Sokolov B.V. [The concept of complex objects proactive management: theoretical and technological basis]. *Izv. vyssh. uchebn. zavedenij: Priborostroenie – Proceedings of the higher educational institutions: Instrumentation*. 2014. vol. 11(57). pp. 7–15. (In Russ.).
8. Mostovoy Ya.A. [Simulation mathematical model of the external environment in the life cycle of the on-board software for controlling the space platform]. *Komp'iuternaia optika – Computer optics*. 2012. vol. 3 (36). pp. 412–418. (In Russ.).
9. Nazarov A.V. [The method of structural-parametric adaptation of multi-level information processing systems using local quality functionals]. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy – Information and control systems*. 2014. vol. 5. pp. 25–33. (In Russ.).
10. Kirillin A.N. et al. [Influence of onboard systems reliability of Earth remote sensing spacecrafts on the survey periodicity indicators]. *Vestnik Samarskogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk – Bulletin of the Samara state aerospace university*. 2013. vol. 4(42). pp. 170–180. (In Russ.).
11. Lokhmatkin V.V., Kurenkov V.I. [Forecasting the productivity of Earth remote sensing spacecrafts surveying taking into account of onboard systems reliability]. *Vestnik Samarskogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk – Bulletin of the Samara state aerospace university*. 2013. vol. 15. no. 4(2). pp. 465–472. (In Russ.).
12. Abrameshin A.E., Zhadnov V.V. [Modeling the failure rate of on-board space equipment integrated circuits due to the impact of electrostatic discharges]. *Tekhnologii EMS – Technologies of electromagnetic compatibility*. 2014. vol. 2(49). pp. 27–34. (In Russ.).
13. Mozgalevskii A. V., Koida A.N. *Voprosy proektirovaniia sistem diagnostirovaniia*. [The problems of designing diagnostic systems]. Leningrad: Energoatomizdat Publ. 1985. 112 p. (In Russ.).
14. Maltsev G.N., Yakimov V.L. [Modern approaches to determining the spacecrafts autonomy level]. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy – Information and control systems*. 2017. vol. 2. pp. 34–43. (In Russ.).
15. GOST R 56526–2015. [Requirements for the reliability and safety of space systems, complexes and automatic spacecraft of a single (small-scale) production with long periods of active existence]. Moscow: Standartov Publ. 2015. 46 p. (In Russ.).
16. Loban A.V. *Informatsionnaia tekhnologiia raspredelenogo diagnostirovaniia kosmicheskikh apparatov* [Information technology of distributed spacecraft diagnostic]. Moscow–Berlin: Direkt-Media Publ. 2015. 146 p. (In Russ.).
17. Larin V.P., Shelest D.K. [Formation of information support for the reliability of on-board equipment at the design stage]. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy – Information and control systems*. 2012. vol. 4. pp. 93–97. (In Russ.).
18. GOST 27.310–95. [Analysis of Types, Consequences and Criticality of Failures. The Main Provisions]. Moscow: Standartov Publ. 2001. 23 p. (In Russ.).

19. Talalaev A.A., Fralenko V.P., Khachumov V.M. [Review of standards and the conceptual design of tools for spacecraft monitoring, control and diagnostics]. *Programmnye Sistemy: teoriya i prilozheniya – Software systems: theory and applications*. 2015. vol. 6. pp. 21–43. (In Russ.).
20. Maltsev G.N., Stogov G.V., Terekhov A.V. [The prospects of spacecraft control complexes creation based on core technology]. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy – Information and control systems*. 2006. vol. 5. pp. 2–5. (In Russ.).
21. Men'shikov V.A. *Poligonnye ispytaniia. Ch.II*. [Ground Testing. Part II]. Moscow: KOSMO Publ. 1999. 237 p. (In Russ.).
22. Jenab K., Pineau J. Failure mode and effect analysis on safety critical components of space travel. *Management Science Letters*. 2015. vol. 5. pp. 669–678.
23. Baig A., Ruzli R., Buang A. Reliability analysis using fault tree analysis: a review. *International Journal of Chemical Engineering and Applications*. 2013. vol. 4. no. 3. pp. 169–173.
24. Takahashi M., Kosaka R., Nanba R. A Study of Fault Tree Analysis for Control Program in Space System. Proc. of 2015 IEEE/SICE International Symposium on System Integration. 2015. pp. 301–306.

В. И. МЕРКУЛОВ, П. А. САДОВСКИЙ
**ОЦЕНИВАНИЕ ДАЛЬНОСТИ И ЕЕ ПРОИЗВОДНЫХ В
ДВУХПОЗИЦИОННОЙ ПАССИВНОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ
СИСТЕМЕ**

Меркулов В.И., Садовский П.А. Оценивание дальности и ее производных в двухпозиционной пассивной радиолокационной системе.

Аннотация. Пассивные радиолокационные системы позволяют обнаруживать и сопровождать источники радиоизлучения на значительно большей дальности, чем активные системы, обеспечивая при этом повышение скрытности и живучести носителей. Однако для эффективной реализации процесса наведения на источник радиоизлучения необходимо иметь на борту кроме оценок угловых координат оценки дальности и скорости. В случае однопозиционных пассивных систем такие оценки можно получить при полете по специальной траектории, однако их точность даже при сопровождении неподвижных объектов низка. Наиболее рациональным решением данной проблемы является использование многопозиционных пассивных систем.

В статье рассмотрена задача оценивания координат в многопозиционных пассивных радиолокационных системах. На основе аппарата линейной аналого-дискретной фильтрации получен алгоритм оценивания дальности и скорости в двухпозиционной пассивной радиолокационной системе. Проведенное имитационное моделирование полученного алгоритма подтвердило его эффективность при существенно меньшей вычислительной сложности, чем у нелинейных вариантов.

Ключевые слова: пассивная радиолокация, двухпозиционные РЛС, аналого-дискретная фильтрация, оценивание дальности и скорости.

1. Введение. Одна из наиболее устойчивых тенденций развития радиолокационной техники — усиление роли пассивных систем в составе общей бортовой информационно-управляющей системы.

Преимуществами пассивных режимов работы радиолокационной системы (РЛС) являются:

- повышение скрытности, а соответственно, и живучести носителя;
- возможности реализации существенно большей дальности обнаружения носителей источников радиоизлучения (ИРИ) по сравнению с активными РЛС, поскольку обнаружение осуществляется по прямому, а не отраженному сигналу [1];
- возможность управления точностью оценивания местоположения ИРИ за счет траекторного управления наблюдением [2];
- возможность продолжения процедур наведения на постановщика активных помех противоборствующей стороны при подавленных каналах дальности и скорости бортовой РЛС [3].

Необходимо, однако, отметить, что для реализации этого процесса на борту наводимого летательного аппарата (ЛА) необходимо иметь не только оценки угловых координат, но и оценки дальности и скорости [4, 5]. Формирование этих оценок в однопозиционных пеленгационных системах выполняется с очень низкой точностью и требует проведения достаточно длительного маневра [6] носителя.

Более предпочтительным является использование двухпозиционных пассивных радиолокационных систем (ДППРЛС), позволяющих практически мгновенно определить местоположение ИРИ и оценить дальность до него и ее производные на основе триангуляционного способа [7].

Решение этой задачи базируется на знании собственного местоположения позиции Π_1 и Π_2 (x_1, z_1 и x_2, z_2), собственных курсов ψ_1, ψ_2 и бортовых пеленгов φ_1, φ_2 , дающих возможность рассчитать углы навигационного треугольника (α_1, α_2 и $\alpha_{ц}$), размер базы D_6 и угол ее наклона φ_6 (рисунок 1).

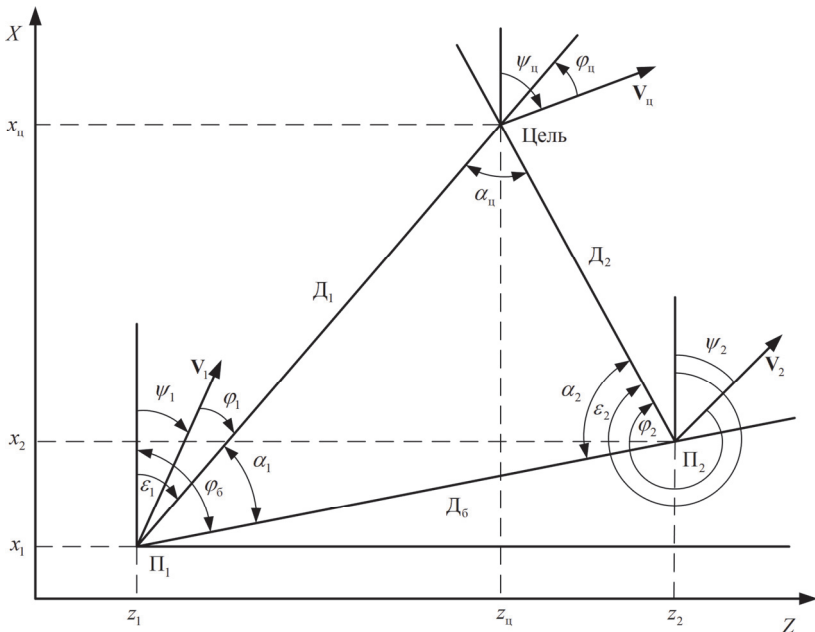


Рис. 1. Геометрия взаимного расположения пеленгационных позиций и цели

Следует отметить, что при одинаковой точности пеленгаторов точность определения местоположения ИРИ цели определяется среднеквадратичной ошибкой [8]:

$$\sigma_{\text{мп}} = \frac{0,0175\sigma_{\varphi}}{\sin \alpha_{\text{ц}}} \sqrt{D_1^2 + D_2^2}, \quad (1)$$

где D_1 и D_2 — расстояния от ИРИ до позиций Π_1 и Π_2 ; σ_{φ} — СКО измерения углов φ_1, φ_2 ; $\alpha_{\text{ц}}$ — бистатический угол между линиями визирования $\Pi_1\text{Ц}$ и $\Pi_2\text{Ц}$.

Анализ (1) показывает, что точность определения местоположения ИРИ зависит не только от ошибок пеленгации, определяемых значением σ_{φ} , но и от геометрии взаимного расположения, определяемого в основном значением $\alpha_{\text{ц}}$ (рисунок 1).

В связи с этим в практике систем перехвата ИРИ одна из позиций считается ударной, наводимой на него с использованием того или иного метода наведения [4], а вторая — информационной, движущейся по траектории, обеспечивающей выполнение условия $\alpha_{\text{ц}} \rightarrow 90$. В общем случае для реализации такой системы наведения необходимо знание оценок D_1, D_2 и их производных \dot{D}_1, \dot{D}_2 [4, 5].

При этом необходимо учитывать следующие особенности наблюдения источников радиоизлучения.

Во-первых, угловые данные о радиоизлучающих целях могут быть получены в разнесенных приемных позициях в один и тот же момент времени либо в разные моменты. Последний вариант встречается на практике достаточно часто. В принципе при измерениях пеленгов целей в первой и второй позициях в разное время их можно привести к одному моменту, но для этого необходимо дополнительно оценивать угловые скорости вращения линий визирования в каждой приемной позиции либо использовать алгоритмы оценивания с текущей коррекцией прогноза по неодновременно приходящим измерениям [9]. Далее предполагается, что приемные позиции являются подвижными и располагаются на летательных аппаратах. Поэтому требуется также измерять скорости их движения и их курсы. В этом случае по прогнозируемым значениям пеленгов цели и положениям ЛА можно рассчитать дальность до цели.

Во-вторых, в ДППРЛС, как правило, имеет место запаздывание в передаче результатов измерений при обмене радиоданными между летательными аппаратами. Объясняется это тем, что каждому ЛА

предоставляется определенный временной интервал для передачи сообщений. Поэтому обработка результатов измерений в бортовых ЭВМ должна вестись с учетом их временного запаздывания.

Необходимо отметить, что формирование оценок дальности и ее производных в ДППРЛС может осуществляться различными способами, обзор которых представлен в [8]. Наиболее распространенными из них являются:

- алгоритмы адаптивной α, β -фильтрации [10];
- алгоритмы на основе теории чувствительности;
- алгоритмы нелинейного оценивания на основе расширенного

фильтра Калмана.

2. Синтез алгоритма оценивания дальности и ее производных. В общем случае взаимосвязи между линейными и угловыми координатами ДППРЛС определяются нелинейными соотношениями, что предопределяет необходимость использования нелинейных процедур оценивания [11-16]. Однако такому подходу присущи два недостатка. Один из них обусловлен необходимостью решения многомерных уравнений Риккати для вычисления коэффициентов усиления невязок. Второй связан со значительным ухудшением точности и устойчивости функционирования фильтра при несоответствии условий функционирования выбранным нелинейным моделям.

Далее рассматривается существенно более простая и робастная процедура линейной фильтрации, дающая возможность сформировать в двухпозиционной пассивной системе взаимосвязанные оценки местоположения ИРИ, дальностей до него и их производных на основе искусственно сформированных так называемых косвенных моделей состояния и измерений.

Синтез будет осуществляться при условии, что выполняются следующие предположения:

- в состав ДППРЛС входят ударная позиция P_2 , осуществляющая наведение на ИРИ, и информационная позиция P_1 , обеспечивающая наилучшие условия для наблюдения ИРИ и минимизирующая (1), что требует знания оценок дальности и скорости [3];

- на каждой позиции имеются оценки собственных курсов (ψ_1, ψ_2), бортовых пеленгов (φ_1, φ_2), угловых скоростей линии визирования (ω_1, ω_2) и результаты вычисления собственных координат (x_1, z_1 и x_2, z_2) (см. рисунок 1);

- в течение времени формирования оценок дальностей и скоростей цель не изменяет скорости и направления полета;

– от ударной позиции Π_2 на информационную Π_1 поступают оценки собственного местоположения x_2 , z_2 , курса ψ_2 , бортового пеленга φ_2 и их производные.

Исходя из этих условий далее будет рассмотрена процедура фильтрации, выполняемой на информационной позиции Π_1 . При этом синтез будет выполняться на основе аппарата линейной аналого-дискретной фильтрации [12].

В общем случае алгоритмы аналого-дискретной фильтрации позволяют для процессов:

$$\mathbf{x}(k) = \mathbf{\Phi}(k, k-1)\mathbf{x}(k-1) + \xi_x(k-1) \quad (2)$$

при наличии наблюдений:

$$\mathbf{z}(k) = \mathbf{Q}_z[\mathbf{H}(k)\mathbf{x}(k) + \xi_n(k)];$$

$$\mathbf{Q}_z(k) = \{Q_{ii}(k)\}, \quad Q_{ii}(k) = \begin{cases} 1, & \text{при } k = nT/\tau, n = 1, 2, 3, \dots, \\ 0, & \text{при } k \neq nT/\tau, \end{cases} \quad (3)$$

сформировать оценки:

$$\hat{\mathbf{x}}(k) = \mathbf{x}_s(k) + \mathbf{K}_\Phi(k)\Delta\mathbf{z}(k), \quad (4)$$

$$\mathbf{x}_s(k) = \mathbf{\Phi}(k, k-1)\hat{\mathbf{x}}(k-1); \quad \hat{\mathbf{x}}_s(0) = \mathbf{x}_0; \quad (5)$$

$$\Delta\mathbf{z}(k) = [\mathbf{z}(k-1) - \mathbf{Q}_z(k)\mathbf{H}(k)\mathbf{x}_s(k)]; \quad (6)$$

$$\mathbf{K}_\Phi(k) = \mathbf{D}(k, k-1)\mathbf{H}^T(k) [\mathbf{H}(k)\mathbf{D}(k, k-1)\mathbf{H}^T(k) + \mathbf{D}_n(k)]^{-1}; \quad (7)$$

$$\mathbf{D}(k) = \begin{cases} [\mathbf{E} - \mathbf{K}_\Phi(k)\mathbf{H}(k)]\mathbf{D}(k, k-1), & \text{при } k = nT/\tau, \\ \mathbf{D}(k, k-1), & \text{при } k \neq nT/\tau, \end{cases} \quad (8)$$

$$\mathbf{D}(k, k-1) = \mathbf{\Phi}(k, k-1)\mathbf{D}(k-1)\mathbf{\Phi}(k, k-1) + \mathbf{D}_x(k-1); \quad \mathbf{D}(0) = \mathbf{D}_0. \quad (9)$$

В этих уравнениях $\mathbf{x}(k)$, $\mathbf{x}_s(k)$, $\hat{\mathbf{x}}(k)$ — векторы состояния, экстраполяции и оценок процесса (2), $\mathbf{\Phi}(k, k-1)$ — матрица перехода; \mathbf{K}_Φ — матричный коэффициент усиления невязки $\Delta\mathbf{z}(k)$; $\mathbf{D}(k)$ и $\mathbf{D}(k, k-1)$ — апостериорная и априорная ковариационные матрицы ошибок фильтрации; $\mathbf{Q}_z(k)$ — матрица признаков прихода измерений;

k — номер шага фильтрации, соответствующий времени $t = k \cdot \tau$; τ — шаг интервала дискретизации; T — интервал прихода измерений.

Вся процедура формирования требуемых оценок $x_{ц}$, $z_{ц}$ и D_i , \dot{D}_i выполняется в три этапа:

- на первом этапе осуществляется расчет координат цели $x_{ц}$, $z_{ц}$ и дальностей D_1 , D_2 , которые послужат основой для косвенных моделей состояния и измерений;

- на втором этапе осуществляется выбор линейных моделей состояния и измерений, обеспечивающих формирование требуемых оценок;

- на третьем этапе формируются алгоритмы линейного оценивания, осуществляющие информационное обеспечение задач наведения ДППРЛС на ИРИ.

На первом этапе координаты цели и дальности до нее с каждой из позиций вычисляются на основе полученных прямых (первичных) измерений координат информационной $x_{1и}$, $z_{1и}$ и ударной $x_{2и}$, $z_{2и}$ позиций, их курсов $\psi_{1и}$, $\psi_{2и}$ и углов линии визирования цели $\varepsilon_{1и}$, $\varepsilon_{2и}$ с них:

$$\begin{aligned} x_{1и} &= x_1 + \xi_{x1и}, & z_{1и} &= z_1 + \xi_{z1и}, & x_{2и} &= x_2 + \xi_{x2и}, & z_{2и} &= z_2 + \xi_{z2и}, \\ \psi_{1и} &= \psi_1 + \xi_{\psi1и}, & \varphi_{1и} &= \varphi_1 + \xi_{\varphi1и}, & \psi_{2и} &= \psi_2 + \xi_{\psi2и}, & \varphi_{2и} &= \varphi_2 + \xi_{\varphi2и}. \end{aligned} \quad (10)$$

Здесь $\xi_{xи}$, $\xi_{zи}$ — шумы определения собственных координат информационной и ударной позиций, $\xi_{\psiи}$ — шумы ошибок определения собственного курса, а $\xi_{\varepsilonи}$ — шумы ошибок измерений углов линии визирования цели с них, характеризуемые СКО $\sigma_{xи}$, $\sigma_{\psiи}$, $\sigma_{\varphiи}$.

Далее любым из подходящих способов, определяемых взаимной геометрией позиций и цели, проводится расчет косвенных (вторичных) измерений. С учетом того, что расстояние от ударной позиции до информационной обычно достаточно велико, был использован триангуляционный метод. Для этого сначала определяется угол наклона базы и ее размер:

$$\varphi_B = \arctg \frac{x_{2и} - x_{1и}}{z_{2и} - z_{1и}}, \quad D_B = \sqrt{(x_{2и} - x_{1и})^2 + (z_{2и} - z_{1и})^2}. \quad (11)$$

Расчет на основе полученного угла наклона базы φ_B и курсов $\psi_{1и}$, $\psi_{2и}$ и бортовых пеленгов $\varphi_{1и}$, $\varphi_{2и}$ внутренних углов пеленгационного треугольника α_1 , α_2 зависит от геометрии расположения цели и позиций. Например, для рисунка 1 они определяются следующим образом:

$$\alpha_1 = \varphi_B - \varphi_1 - \psi_1, \quad \alpha_2 = |\varphi_B - \varphi_2 - \psi_2| - \pi. \quad (12)$$

Зная (11), (12) получаем дальности до цели:

$$D_1 = D_B \frac{\sin \alpha_2}{\sin(\alpha_1 + \alpha_2)}, \quad D_2 = D_B \frac{\sin \alpha_1}{\sin(\alpha_1 + \alpha_2)} \quad (13)$$

и ее координаты:

$$x_{ц} = x_{1н} + D_B \cos \varepsilon_{1н}, \quad z_{ц} = z_{1н} + D_B \sin \varepsilon_{1н}. \quad (14)$$

На втором этапе на основе гипотезы движения с постоянной первой производной можно получить модель состояния:

$$\begin{aligned} x_{ц}(k) &= x_{ц}(k-1) + V_{xц}(k-1)\tau, & V_{xц}(k) &= V_{xц}(k-1) + \xi_{xц}, \\ z_{ц}(k) &= z_{ц}(k-1) + V_{zц}(k-1)\tau, & V_{zц}(k) &= V_{zц}(k-1) + \xi_{zц}, \\ D_1(k) &= D_1(k-1) + V_{сб1}(k-1)\tau, & V_{сб1}(k) &= V_{сб1}(k-1) + \xi_{V_{сб1}}, \\ D_2(k) &= D_2(k-1) + V_{сб2}(k-1)\tau, & V_{сб2}(k) &= V_{сб2}(k-1) + \xi_{V_{сб2}}, \\ \varphi_1(k) &= \varphi_1(k-1) + \omega_1(k-1)\tau, & \omega_1(k) &= \omega_1(k-1) + \xi_{\omega_1}. \end{aligned} \quad (15)$$

где ω_1 — угловая скорость цели с информационной позиции.

Уравнения наблюдения относительно косвенных измерений (13), (14), выбранные с учетом выполнения условия наблюдаемости [12], определяются соотношениями:

$$\begin{aligned} x_{цн}(k) &= Q_x [x_{ц}(k) + \xi_{xн}], & z_{цн}(k) &= Q_z [z_{ц}(k) + \xi_{zн}], \\ D_{1н}(k) &= Q_{D1} [D_1(k) + \xi_{D1н}], & D_{2н}(k) &= Q_{D2} [D_2(k) + \xi_{D2н}], \\ \varphi_{1н}(k) &= Q_{\varphi1} [\varphi_1(k) + \xi_{\varphi1н}], \end{aligned} \quad (16)$$

где $x_{цн}$, $z_{цн}$ определяются (14), $D_{1н}$, $D_{2н}$ — соотношениями (13), $\varphi_{1н}$ измеряется угломером, а Q_x , Q_z , Q_{D1} , Q_{D2} , $Q_{\varphi1}$ — признаки прихода соответствующих измерений.

В математическом плане постановка задачи формулируется следующим образом. Для системы (15) при наличии косвенных измерений (16), полученных из первичных измерений (10) по формулам (11)-(14), необходимо по правилам (4)-(9) получить оценки координат цели $\hat{x}_{ц}$, $\hat{z}_{ц}$, ее скорости в проекциях на оси системы координат $\hat{V}_{xц}$, $\hat{V}_{zц}$, а также дальностей \hat{D}_1 , \hat{D}_2 от информационной и ударной позиций до

цели, скоростей сближения $\hat{V}_{сб1}$, $\hat{V}_{сб2}$ с ней, а также бортового пеленга $\hat{\varphi}_1$ цели с информационной позиции и его угловой скорости $\hat{\omega}_1$.

Пусть векторы состояния и измерений из (2), (3) имеют вид:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k) &= [x_{ц}, V_{хц}, z_{ц}, V_{зц}, D_1, V_{сб1}, D_2, V_{сб2}, \varphi_{г1}, \omega_{\varphi 1}]^T, \\ \mathbf{z}(k) &= [x_{цн}, z_{цн}, D_{1н}, D_{2н}, \varphi_{1н}]^T. \end{aligned} \quad (17)$$

Поставив в соответствие (15), (16) с (2), (3) и с учетом (17), получим векторно-матричные выражения, необходимые для выполнения процедуры фильтрации на Π_1 :

$$\Phi(k, k-1) = \begin{bmatrix} 1 & \tau & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \tau & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \tau & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \tau & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \tau \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (18)$$

$$\xi_x(k-1) = [0, \xi_{хц}, 0, \xi_{зц}, 0, \xi_{V1}, 0, \xi_{V2}, 0, \xi_{\omega\varphi 1}]^T,$$

$$\mathbf{D}_x(k-1) = \text{diag}[0, D_{хц}, 0, D_{зц}, 0, D_{V1}, 0, D_{V2}, 0, D_{\omega\varphi 1}],$$

$$\mathbf{H}(k) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad (19)$$

$$\xi_{н}(k) = [\xi_{нх}, \xi_{нз}, \xi_{нD1}, \xi_{нD2}, \xi_{н\varphi 1}]^T,$$

$$\mathbf{Q} = \text{diag}[Q_x, Q_z, Q_{D1}, Q_{D2}, Q_{\varphi 1}],$$

$$\mathbf{D}_n(k) = \text{diag} [D_{nx}, D_{uz}, D_{uД1}, D_{uД2}, D_{u\phi1}].$$

$$\mathbf{D}(k, k-1) = [d_{ij}(k, k-1)], \quad \mathbf{D}(k) = [d_{ij}(k)], \quad i = \overline{1, 10}, \quad j = \overline{1, 10}. \quad (20)$$

Тогда в соответствии с (4)-(6) можно получить алгоритм фильтрации:

$$\begin{aligned} \hat{x}_{\text{II}}(k) &= x_{\text{II}\varnothing} + k_{\Phi 1,1} \Delta z_{\text{XII}} + k_{\Phi 1,2} \Delta z_{\text{ZII}} + k_{\Phi 1,3} \Delta z_{\text{ДI}} + k_{\Phi 1,4} \Delta z_{\text{ДII}} + k_{\Phi 1,5} \Delta z_{\phi 1}; \\ \hat{V}_{\text{XII}}(k) &= V_{\text{XII}\varnothing} + k_{\Phi 2,1} \Delta z_{\text{XII}} + k_{\Phi 2,2} \Delta z_{\text{ZII}} + k_{\Phi 2,3} \Delta z_{\text{ДI}} + k_{\Phi 2,4} \Delta z_{\text{ДII}} + k_{\Phi 2,5} \Delta z_{\phi 1}; \\ \hat{z}_{\text{II}}(k) &= z_{\text{II}\varnothing} + k_{\Phi 3,1} \Delta z_{\text{XII}} + k_{\Phi 3,2} \Delta z_{\text{ZII}} + k_{\Phi 3,3} \Delta z_{\text{ДI}} + k_{\Phi 3,4} \Delta z_{\text{ДII}} + k_{\Phi 3,5} \Delta z_{\phi 1}; \\ \hat{V}_{\text{ZII}}(k) &= V_{\text{ZII}\varnothing} + k_{\Phi 4,1} \Delta z_{\text{XII}} + k_{\Phi 4,2} \Delta z_{\text{ZII}} + k_{\Phi 4,3} \Delta z_{\text{ДI}} + k_{\Phi 4,4} \Delta z_{\text{ДII}} + k_{\Phi 4,5} \Delta z_{\phi 1}; \\ \hat{\text{Д}}_1(k) &= \text{Д}_{1\varnothing} + k_{\Phi 5,1} \Delta z_{\text{XII}} + k_{\Phi 5,2} \Delta z_{\text{ZII}} + k_{\Phi 5,3} \Delta z_{\text{ДI}} + k_{\Phi 5,4} \Delta z_{\text{ДII}} + k_{\Phi 5,5} \Delta z_{\phi 1}; \\ \hat{V}_{\text{сб1}\varnothing}(k) &= V_{\text{сб1}\varnothing} + k_{\Phi 6,1} \Delta z_{\text{XII}} + k_{\Phi 6,2} \Delta z_{\text{ZII}} + k_{\Phi 6,3} \Delta z_{\text{ДI}} + k_{\Phi 6,4} \Delta z_{\text{ДII}} + k_{\Phi 6,5} \Delta z_{\phi 1}; \\ \hat{\text{Д}}_2(k) &= \text{Д}_{2\varnothing} + k_{\Phi 7,1} \Delta z_{\text{XII}} + k_{\Phi 7,2} \Delta z_{\text{ZII}} + k_{\Phi 7,3} \Delta z_{\text{ДI}} + k_{\Phi 7,4} \Delta z_{\text{ДII}} + k_{\Phi 7,5} \Delta z_{\phi 1}; \\ \hat{V}_{\text{сб2}\varnothing}(k) &= V_{\text{сб2}\varnothing} + k_{\Phi 8,1} \Delta z_{\text{XII}} + k_{\Phi 8,2} \Delta z_{\text{ZII}} + k_{\Phi 8,3} \Delta z_{\text{ДI}} + k_{\Phi 8,4} \Delta z_{\text{ДII}} + k_{\Phi 8,5} \Delta z_{\phi 1}; \\ \hat{\phi}_1(k) &= \phi_{1\varnothing} + k_{\Phi 9,1} \Delta z_{\text{XII}} + k_{\Phi 9,2} \Delta z_{\text{ZII}} + k_{\Phi 9,3} \Delta z_{\text{ДI}} + k_{\Phi 9,4} \Delta z_{\text{ДII}} + k_{\Phi 9,5} \Delta z_{\phi 1}; \\ \hat{\omega}_1(k) &= \omega_{1\varnothing} + k_{\Phi 10,1} \Delta z_{\text{XII}} + k_{\Phi 10,2} \Delta z_{\text{ZII}} + k_{\Phi 10,3} \Delta z_{\text{ДI}} + k_{\Phi 10,4} \Delta z_{\text{ДII}} + k_{\Phi 10,5} \Delta z_{\phi 1}; \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} x_{\text{II}\varnothing}(k) &= \hat{x}_{\text{II}}(k-1) + \hat{V}_{\text{XII}}(k-1) \cdot \tau, & x_{\text{II}\varnothing}(0) &= x_{\text{II}0}; \\ V_{\text{XII}\varnothing}(k) &= \hat{V}_{\text{XII}}(k-1), & V_{\text{XII}\varnothing}(0) &= V_{\text{XII}0}; \\ z_{\text{II}\varnothing}(k) &= \hat{z}_{\text{II}}(k-1) + \hat{V}_{\text{ZII}}(k-1) \cdot \tau, & z_{\text{II}\varnothing}(0) &= z_{\text{II}0}; \\ V_{\text{ZII}\varnothing}(k) &= \hat{V}_{\text{ZII}}(k-1), & V_{\text{ZII}\varnothing}(0) &= V_{\text{ZII}0}; \\ \text{Д}_{1\varnothing}(k) &= \hat{\text{Д}}_1(k-1) + \hat{V}_{\text{сб1}\varnothing}(k-1) \cdot \tau, & \text{Д}_{1\varnothing}(0) &= \text{Д}_{1,0}; \\ V_{\text{сб1}\varnothing}(k) &= \hat{V}_{\text{сб1}\varnothing}(k-1), & V_{\text{сб1}\varnothing}(0) &= V_{\text{сб1},0}; \\ \text{Д}_{2\varnothing}(k) &= \hat{\text{Д}}_2(k-1) + \hat{V}_{\text{сб2}\varnothing}(k-1) \cdot \tau, & \text{Д}_{2\varnothing}(0) &= \text{Д}_{2,0}; \\ V_{\text{сб2}\varnothing}(k) &= \hat{V}_{\text{сб2}\varnothing}(k-1), & V_{\text{сб2}\varnothing}(0) &= V_{\text{сб2},0}; \\ \phi_{1\varnothing}(k) &= \hat{\phi}_1(k-1) + \hat{\omega}_1(k-1) \cdot \tau, & \phi_{1\varnothing}(0) &= \phi_{1,0}; \\ \omega_{1\varnothing}(k) &= \hat{\omega}_1(k-1); & \omega_{1\varnothing}(0) &= \omega_{\phi 1,0}, \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \Delta z_{x_1}(k) &= x_{11}(k) - Q_x x_{10}(k); & \Delta z_{z_1}(k) &= z_{11}(k) - Q_z z_{10}(k), \\ \Delta z_{D1}(k) &= D_{11}(k) - Q_{D1} D_{10}(k); & \Delta z_{D2}(k) &= D_{21}(k) - Q_{D2} D_{20}(k), \\ \Delta z_{\varphi_1}(k) &= \varphi_{11}(k) - Q_{\varphi_1} \varphi_{10}(k), \end{aligned} \quad (23)$$

а коэффициенты $k_{\Phi_{i,j}}$, $i = \overline{1,10}$, $j = \overline{1,5}$, усиления невязок (23) рассчитываются в процессе решения уравнений (7)-(9).

Особенностью полученного алгоритма фильтрации (21)-(23) является использование косвенных измерений (13), (14), позволяющих ограничиться линейной моделью измерений (16) и линейным вариантом калмановской фильтрации, что существенно снижает вычислительную сложность алгоритма [15-16].

Кроме того, использование аналого-дискретной фильтрации (4)-(9) позволяет получать текущие оценки при достаточно редко поступающих измерениях.

3. Исследование работоспособности алгоритма оценивания дальности. Исследование полученного алгоритма проводилось в процессе совместного моделирования движения обеих позиций и цели при следующих условиях.

1. Позиции и цель движутся в горизонтальной плоскости по произвольным траекториям, которые определяются следующими уравнениями:

– для цели:

$$\begin{aligned} x_{11}^*(k) &= x_{11}^*(k-1) + V_{11}^*(k-1) \cdot \sin \psi_{11}^*(k-1) \tau, & x_{11}^*(0) &= x_{110}^*; \\ z_{11}^*(k) &= z_{11}^*(k-1) + V_{11}^*(k-1) \cdot \cos \psi_{11}^*(k-1) \tau, & z_{11}^*(0) &= z_{110}^*; \\ V_{11}^*(k) &= V_{11}^*(k-1) + a_{11}^*(k-1) \cdot \tau, & V_{11}^*(0) &= V_{110}^*; \\ a_{11}^*(k) &= a_{11}^*(k-1) + \xi_{11}^*, & a_{11}^*(0) &= a_{110}^*; \end{aligned} \quad (24)$$

– для информационной и ударной позиций:

$$\begin{aligned} x_i^*(k) &= x_i^*(k-1) + V_i^*(k-1) \cdot \sin \psi_i^*(k-1) \tau, & x_i^*(0) &= x_{i0}^*; \\ z_i^*(k) &= z_i^*(k-1) + V_i^*(k-1) \cdot \cos \psi_i^*(k-1) \tau, & z_i^*(0) &= z_{i0}^*; \\ V_i^*(k) &= V_i^*(k-1) + a_i^*(k-1) \cdot \tau, & V_i^*(0) &= V_{i0}^*; \\ a_i^*(k) &= a_i^*(k-1) + \xi_{ai}^*, & a_i^*(0) &= a_{i0}^*; \end{aligned} \quad (25)$$

где x_{11}^* , z_{11}^* и x_i^* , z_i^* , $i = 1, 2$, — «эталонные» координаты цели и обеих позиций в неподвижной декартовой системе координат соответствен-

но, $V_{ц}^*$, V_i^* , $a_{ц}^*$, a_i^* , $\Psi_{ц}^*$ и Ψ_i^* — их скорость, продольное ускорение и курс соответственно, $\xi_{ц}^*$, ξ_{ai}^* — возмущения движения. Курсы цели $\Psi_{ц}^*(k) = \Psi_{ц}(k)$ и позиций $\Psi_i^*(k1) = \Psi_i(k)$ формируются программным способом и определяются условиями моделирования.

2. Первичные измерения формируются из (24), (25) по правилам:

$$\begin{aligned} x_{1н} &= x_1^* + \xi_{хн}, & z_{1н} &= z_1^* + \xi_{zn}, & x_{2н} &= x_2^* + \xi_{хн}, & z_{2н} &= z_2^* + \xi_{zn}, \\ \psi_{1н} &= \psi_1^* + \xi_{\psiн}, & \psi_{2н} &= \psi_2^* + \xi_{\psiн}, \end{aligned} \quad (26)$$

$$\varepsilon_{1н} = \arctg \frac{z_{ц}^* - z_i^*}{x_{ц}^* - x_i^*} + \xi_{\varepsilonн}, \quad \varepsilon_{2н} = \arctg \frac{z_{ц}^* - z_i^*}{x_{ц}^* - x_i^*} + \xi_{\varepsilonн}, \quad (27)$$

на основе которых при помощи (11)-(14) получаются косвенные измерения (16).

3. Измерения от обеих позиций приходят одновременно при следующих интервалах $T = 0,05; 0,1; 0,5; 1; 2$ с. Шаги моделирования и экстраполяции приняты одинаковыми $\tau = 0,01$ с.

4. В качестве показателей эффективности используются текущее среднее квадратичное отклонение ошибок фильтрации, определяемое соотношениями:

$$\sigma_{xi}(k) = \sqrt{\frac{1}{J-1} \sum_{n=1}^J [m_{xi}(k) - \hat{x}_i(k)]^2}, \quad (28)$$

где J — число реализаций.

Целью исследования являлось сравнение теоретической ($T = 0,05$ с) и реальной ($T \sim 1$ с) эффективности алгоритма фильтрации (21)-(23).

Для каждого набора исходных данных проводилось 50 экспериментов, результаты которых были обработаны для получения усредненных значений показателей эффективности.

Начальные параметры движения информационной и ударной позиций и цели для одного из исследовавшихся вариантов представлены в таблице 1, а на рисунке 2 показаны траектории их движения. Показатели точности измерений для обеих позиций приняты одинаковыми и указаны в таблице 2.

Таблица 1. Начальные параметры движения

	x_0 , км	z_0 , км	V_0 , м/с	a_0 , м/с ²	ψ_0 , °	σ_a , м/с ²
Информационная позиция	0	0	250	0	0	0,01
Ударная позиция	0	300	250	0	0	0,01
Цель	250	200	200	0	315	0,01

Таблица 2. СКО ошибок измерений

Прямые измерения		
σ_{xz} , м	σ_{ψ} , °	σ_{φ} , °
100	0,01	0,09
Косвенные измерения		
$\sigma_{нд}$, м	$\sigma_{и,х}$, м	$\sigma_{и,з}$, м
491,2	511,4	402,8

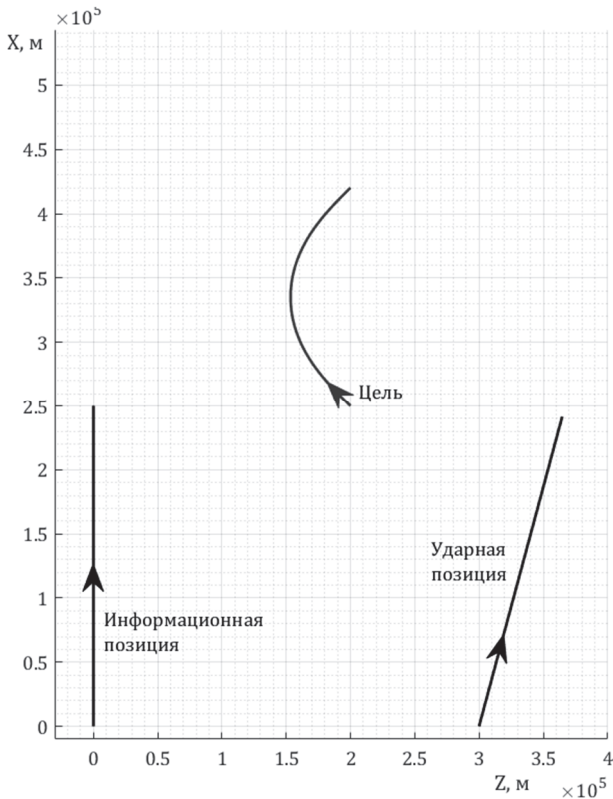


Рис. 2. Траектории полёта информационной и ударной позиций и цели

Графики изменения дальностей от позиций до цели во времени приведены на рисунке 3, а скоростей сближения с ней — на рисунке 4.

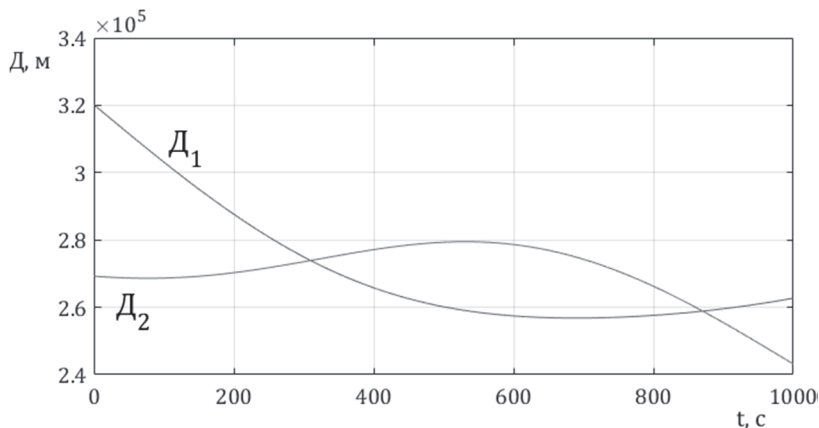


Рис. 3. Изменение дальностей от позиций до цели

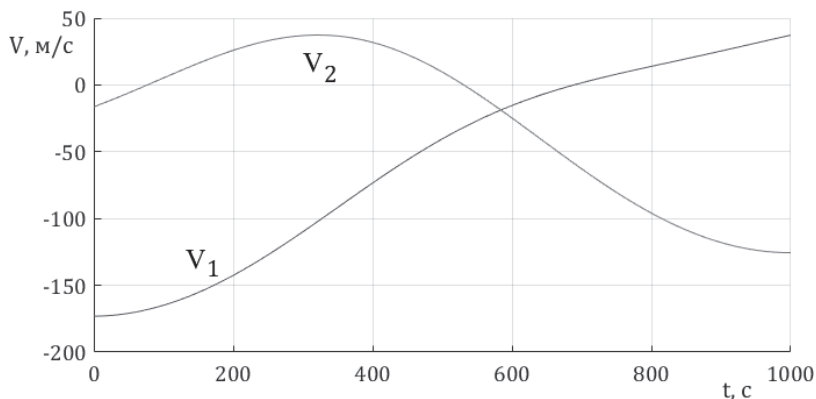


Рис. 4. Изменение скоростей сближения позиций с целью

На рисунках 5-7 показаны результаты моделирования данного варианта для первых 150 с. На рисунке 5 приведены погрешности оценивания координат цели $\Delta x_{ц} = \hat{x}_{ц} - x_{ц}^*$ и $\Delta z_{ц} = \hat{z}_{ц} - z_{ц}^*$ по сравнению с погрешностью косвенных измерений.

На рисунках 6 и 7 — погрешности оценивания дальностей от цели до позиций $\Delta D_i = \hat{D}_i - D_i^*$ и скоростей сближения $\Delta V_i = \hat{V}_i - V_i^*$ с

ними соответственно. Для расчета эталонных дальностей D_i^* и скоростей сближения V_i^* используются (24), (25).

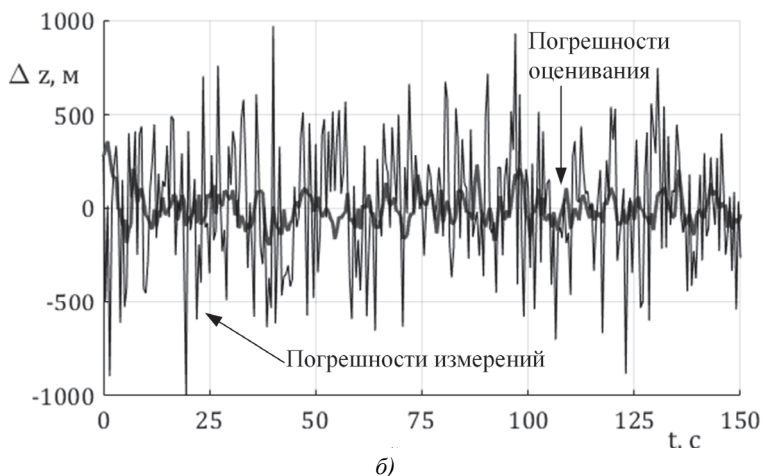
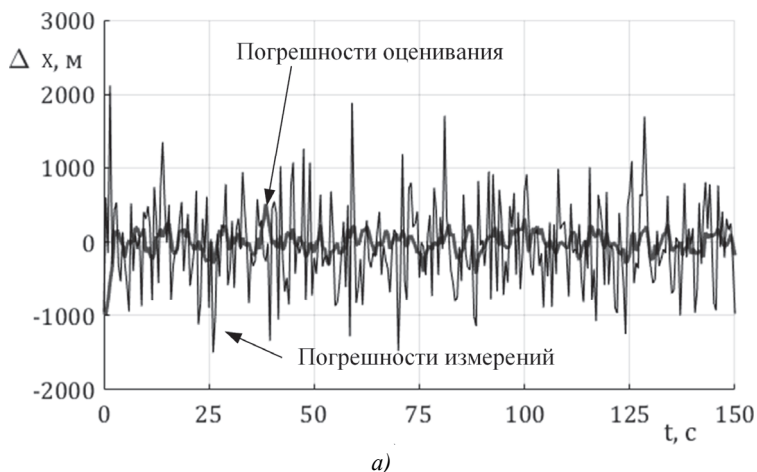


Рис. 5. Графики текущих погрешностей оценивания координат цели

В таблице 3 приведены установившиеся значения среднеквадратичного отклонение ошибок оценивания координат цели, дальностей и скоростей сближения с ней.

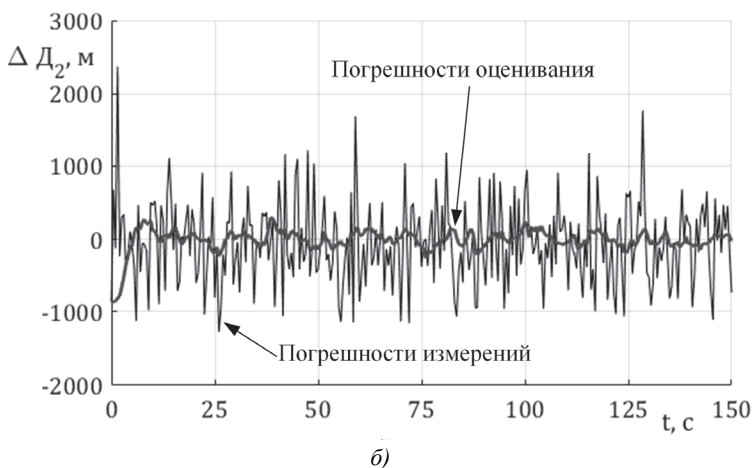
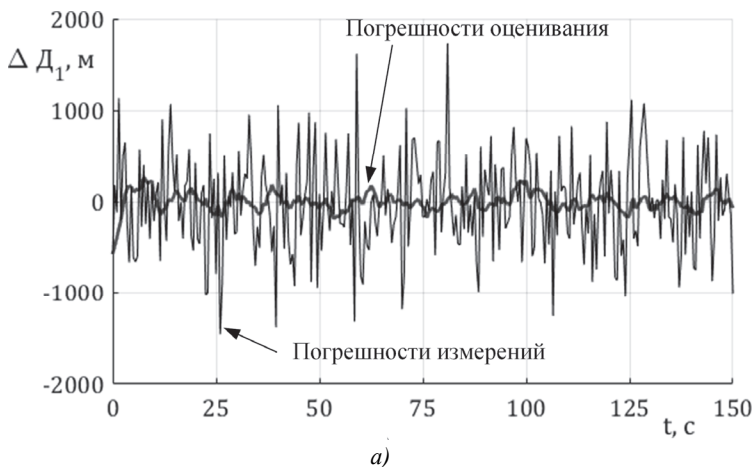
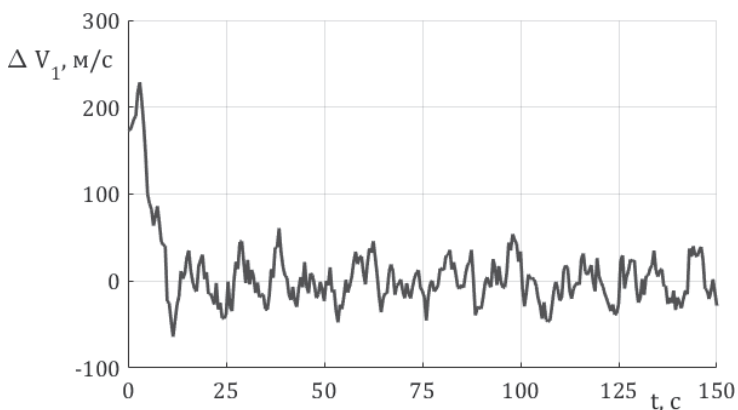
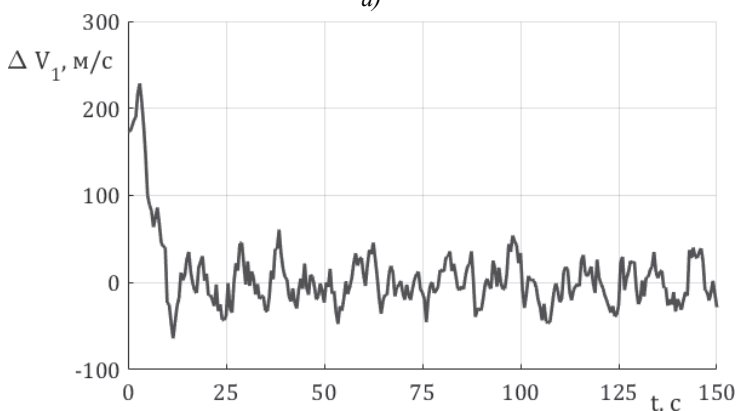


Рис. 6. Графики текущих погрешностей оценивания дальности от цели до информационной (а) и ударной (б) позиций

Как видно из представленных результатов, полученный фильтр даже в достаточно сложных условиях, сильно отличающихся от гипотез, при которых он был получен, позволяет за короткое время (время регулирования по всем оцениваемым координатам состояния не превышает 10 с) получить достаточно точные оценки. Выигрыш по точности при этом относительно косвенных измерений (см. таблицу 2) составляет порядка 5 раз.



a)



б)

Рис. 7. Графики текущих погрешностей оценивания скорости сближения цели с информационной (а) и ударной (б) позициями

Таблица 3. Устоявшиеся СКО ошибок оценивания координат

σ_x , м	σ_z , м	$\sigma_{д1}$, м	$\sigma_{д2}$, м	σ_{V1} , м/с	σ_{V2} , м/с
114,1	85,8	87,2	84,9	24,5	22,8

Отдельно исследовалось влияние интервала прихода измерений на показатели эффективности алгоритма. Для этого моделирование было произведено для следующих интервалов: $T = 0,05; 0,1; 0,5; 1; 2$ с. Графики изменения СКО ошибок оценивания от величины интервала приведены на рисунке 8 (координаты цели), 9 (дальности до цели) и 10 (скорости сближения). Горизонтальными прямыми на рисунках 8 и 9 обозначены СКО соответствующих косвенных измерений.

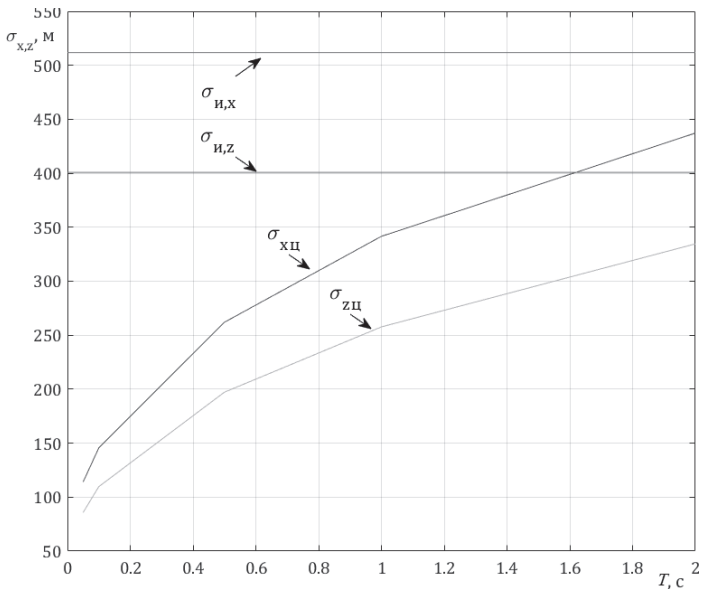


Рис. 8. Зависимость СКО ошибок оценивания координат цели от интервала прихода измерений

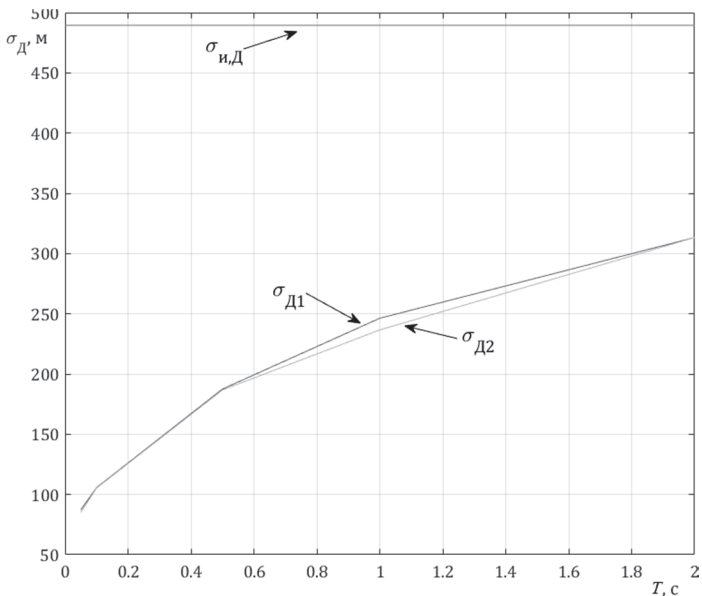


Рис. 9. Зависимость СКО ошибок оценивания дальности от интервала прихода измерений

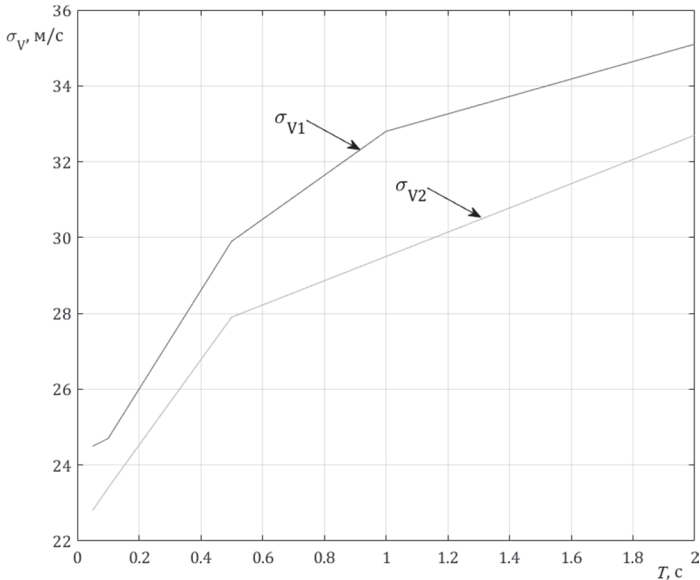


Рис. 10. Зависимость СКО ошибок оценивания скорости сближения от интервала прихода измерений

Как видно из рисунков 8-10, СКО ошибок оценивания возрастает с увеличением интервала прихода измерений и при $T \approx 2 \dots 3$ с практически сравнивается с СКО самих косвенных измерений.

4. Заключение. Проведённые исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. Полученные результаты моделирования подтверждают, что предлагаемые алгоритмы линейной аналого-дискретной фильтрации по косвенным измерениям для пассивных двухпозиционных систем устойчиво обеспечивают достаточно точное оценивание дальности и скорости цели, даже при достаточно редких (дискретных) измерениях бортовых пеленгов.

2. Выигрыш по точности предлагаемого алгоритма достигает 5 раз при интервале прихода измерений $T \approx 0,05, \dots, 0,1$ с.

3. Максимальный допустимый интервал прихода измерений составляет $T \approx 2 \dots 3$ с, при этом СКО ошибок оценивания координат практически сравнивается с СКО самих косвенных измерений.

4. Полученные результаты не накладывают ограничений на возможность их реализации, при этом вычислительные затраты на реализацию полученного метода существенно меньше, чем для нелинейных вариантов фильтра Калмана.

Литература

1. Бортовые системы управления боевыми режимами современных и перспективных самолетов. Книга 1. Аналитический обзор по материалам зарубежных информационных источников. / Под ред. Е.А. Федосова // М.: ГосНИИ АС. 2009.
2. Авиационные системы радиоуправления / Под ред. В.С. Вербы и В.И. Меркулова // М.: Радиотехника. 2014. 376 с.
3. *Верба В.С.* Авиационные комплексы радиолокационного дозора и наведения. Принципы построения, проблемы разработки и особенности функционирования // М.: Радиотехника. 2014. 528 с.
4. *Меркулов В.И. и др.* Авиационные системы радиоуправления. Т. 2. Радиоэлектронные системы самонаведения // М.: Радиотехника. 2003. 390 с.
5. *Меркулов В.И.* Управление пассивными двухпозиционными РЛС в режиме наведения на радиоизлучающую воздушную цель // Радиотехника. 2005. № 6. С. 22–27.
6. *Белик Б.В., Сузанский Д.Н., Чернов В.С.* Способы оценивания дальности до подвижного источника радиоизлучения на основе угломерных данных на борту летательного аппарата // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2014. Т. 12. № 3. С. 19–25.
7. Системы радиоуправления. Кн. 1. Состояния и тенденции развития систем радиоуправления / Под ред. В. С. Вербы // М.: Радиотехника. 2013. 268 с.
8. *Дрогалин В.В. и др.* Алгоритмы оценивания координат и параметров движения радиоизлучающих целей в угломерных двухпозиционных бортовых радиолокационных системах // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2003. Т. 1. № 1. С. 4–24.
9. *Дрогалин В.В. и др.* Оценивание параметров линейной траектории движения цели в угломерной двухпозиционной системе на основе алгоритмов α, β -фильтрации // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2003. Т. 1. № 2-3. С. 14–19.
10. *Меркулов В.И., Чернов В.С., Радоминов О.Е.* Алгоритм обработки неодновременно поступающих данных в пассивных угломерных многопозиционных системах на основе расширенного фильтра Калмана // Радиотехника. 2011. № 6. С. 108–112.
11. Оценивание дальности и скорости в радиолокационных системах. Ч. 3 / Под ред. В.С. Вербы, В.И. Меркулова // М. Радиотехника. 2010.
12. *Ярлыков М.С., Бозачев А.С., Меркулов В.И., Дрогалин В.В.* Радиоэлектронные комплексы навигации прицеливания и управления вооружением летательных аппаратов. Т. 1. Теоретические основы // М.: Радиотехника. 2012. 504 с.
13. *He Y., Hiu J., Guan X.* Radar data processing with applications // John Wiley & Sons, Inc. 2016. 536 p.
14. *Dahmani M., Meche A., Keche M., Ouamri A.* A new decoupled unbiased converted measurement adaptive α, β filter developed for target tracking // 2017 Seminar on Detection Systems Architecture and Technologies (DAT). 2017. pp. 1–6.
15. *Kumar R.S.R., Ramaiah M.V., Kumar J.R.* Performance comparison of α - β - γ filter and kalman filter for CA, NCA target tracking using bistatic range and range rate measurements // 2014 International Conference on Communications and Signal Processing (ICCSP). 2014. pp. 1462–1466.
16. *Vinaykumar M., Ravi Kumar J.* Performance evaluation of Alpha-Beta and Kalman filter for object tracking // 2014 IEEE International Conference on Advanced Communications, Control and Computing Technologies. 2014. pp. 1369–1373.

Меркулов Владимир Иванович — д-р техн. наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, заместитель генерального конструктора, АО "Концерн "Вега". Область научных интересов: оптимизация систем радиолокации и радиоуправления. Число научных публикаций — 588. vegapost2010@gmail.com; Кутузовский пр-т, 34, Москва, 121170; р.т.: +74997534004, доб. 9250. Факс: +74997534004.

Садовский Петр Алексеевич — к-т техн. наук, начальник лаборатории отдела перспектив развития систем радиоуправления и радиолокации, АО «Концерн «Вега». Область научных интересов: оптимизация систем радиоуправления. Число научных публикаций — 17. spapost@gmail.com; Кутузовский пр-т, 34, Москва, 121170; р.т.: +74997534004, доб. 9244, Факс: +74959331563.

Поддержка исследования. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты 15-08-04000-а, 16-08-00209-а).

V.I. MERKULOV, P.A. SADOVSKIY
**ESTIMATION OF DISTANCE AND ITS DERIVATIVES IN THE
 BISTATIC PASSIVE RADAR LOCATION SYSTEM**

Merkulov V.I., Sadovskiy P.A. Estimation of Distance and its Derivatives in the Bistatic Passive Radar Location System.

Abstract. Passive radar systems make it possible to detect and track sources of radio emission at a longer range than active systems, while increasing the stealth and survivability of its carriers. However, in order to carry out effective guidance on the emission source, it is necessary to have, on top of the estimates of the angular coordinates, estimates of range and velocity. In the case of single-passive systems, such estimates can be obtained by flying on a special trajectory, but accuracy even when tracking stationary objects is low. The most rational solution to this problem is to use multi-position passive systems.

The problem of estimating the coordinates in multi-position passive radar systems is considered in the article. Based on the apparatus of linear analog-discrete filtering, an algorithm is obtained for estimating the range and speed in a bistatic passive radar system. Results of simulation of the algorithms confirm its effectiveness and lesser computational cost when compared with non-linear algorithms.

Keywords: passive radar, bistatic radar, analog-discrete filtering, distance and velocity estimation.

Merkulov Vladimir Ivanovich — Ph.D., Dr. Sci., professor, Honored scientist of Russian Federation, deputy chief designer, Radio-engineering Corporation Vega JSC. Research interests: optimization of radar and radiocontrol systems. The number of publications — 588. vegapost2010@gmail.com; 34, Kutuzov avenue, 121170, Moscow, Russia; office phone: +74997534004 ext. 9250, Fax: +74997534004.

Sadovskiy Petr Alekseyevich — Ph.D., head of laboratory, prospects of development of radio control systems and radar department, Radio-engineering Corporation Vega JSC. Research interests: optimization of radiocontrol systems. The number of publications — 17. spapost@gmail.com; 34, Kutuzov avenue, 121170, Moscow, Russia; office phone: +74997534004, ext. 9244, Fax: +74959331563.

Acknowledgements. This research is supported by RFBR (grants 15-08-04000-a, 16-08-00209-a).

References

1. *Bortovye sistemy upravleniya boevymi rezhimami sovremennyh i perspektivnyh samoletov. Kniga 1. Analiticheskij obzor po materialam zarubezhnyh informacionnyh istochnikov. Pod red. E.A. Fedosova* [On-board control systems for combat modes of modern and prospective aircraft. Book 1. Analytical review on the materials of foreign information sources. Edited by E.A. Fedosov]. M.: GosNII AS. 2009. 172 p. (In Russ.).
2. *Aviacionnye sistemy radioupravleniya. Pod red. V.S. Verby i V.I. Merkulova* [Airborne radio control systems. Edited by V.S. Verba and V.I. Merkulov]. M.: Radiotekhnika. 2014. 376 p. (In Russ.).
3. Verba V.S. *Aviacionnye komplekсы radiolokacionnogo dozora i navedenija. Principy postroenija, problem razrabotki i osobennosti funkcionirovanija* [Airborne systems of

- radar surveillance and guidance. Construction principles, development problems and functioning]. M.: Radiotekhnika. 2014. 528 p. (In Russ.).
4. Merkulov V.I., et al. *Aviacionnye sistemy radioupravlenija. T. 2. Radioelektronnye sistemy samonavedenija*. [Aviation radio control systems. T. 2. Radio-electronic systems of homing]. M.: Radiotekhnika. 2003. 390 p. (In Russ.).
 5. Merkulov V.I. [Control of passive two-position radar in the mode of guidance for a radio-emitting air target]. *Radiotekhnika — Radiotechnics*. 2005. vol. 6. pp. 22–27. (In Russ.).
 6. Belik B.V., Suzansky D.N., Chernov V.S. [Methods of estimating the range to a mobile source of radio emission based on the goniometer data on board an aircraft] *Informacionno-izmeritel'nye i upravljajushhie sistemy — Information-measuring and control systems*. 2014. Issue 12. vol. 3. pp. 19–25. (In Russ.).
 7. *Sistemy radioupravlenija. Kn. 1. Sostojanie i tendencii razvittija sistem radioupravlenija. Pod red. V.S. Verby* [Radio control systems. Book 1. State and development trends of radio control systems. Edited by V.S. Verba]. M.: Radiotekhnika. 2013. 268 p. (In Russ.).
 8. Drogalin V.V. et al. [Algorithms for estimating the coordinates and parameters of the motion of radio-emitting targets in the goniometric two-position onboard radar systems]. *Informacionno-izmeritel'nye i upravljajushhie sistemy — Information-measuring and control systems*. 2003. Issue 1. vol. 1. pp. 4–24. (In Russ.).
 9. Drogalin V.V. et al. [Estimation of the parameters of the linear trajectory of the target's motion in the angular two-position system based on the $\alpha\beta$ -filtration algorithms]. *Informacionno-izmeritel'nye i upravljajushhie sistemy — Information-measuring and control systems*. 2003. Issue 1. vol. 2-3. pp. 14–19. (In Russ.).
 10. Merkulov V.I., Chernov V.S., Radominov O.E. [Algorithm for processing non-simultaneous incoming data in passive goniometric multi-position systems based on Kalman's extended filter]. *Radiotekhnika — Radiotechnics*. 2011. vol. 6. pp. 108–112. (In Russ.).
 11. *Ocenivanie dal'nosti i skorosti v radiolokacionnyh sistemah. Ch. 3. Pod red. V.S. Verby, V.I. Merkulova* [Estimation of range and speed in radar systems. Part 3. Edited by V.S. Verba, V.I. Merkulov]. M.: Radiotekhnika. 2010. (In Russ.).
 12. Yarlykov M.S., Bogachev A.S., Merkulov V.I., Drogalin V.V. *Radioelektronnye komplekсы navigacii pricelivaniya i upravlenija voozuzheniem letatel'nyh apparatov. T. 1. Teoreticheskie osnovy* [Radio-electronic navigation systems aiming and controlling aircraft armament. Issue 1. Theoretical Foundations]. M.: Radiotekhnika. 2012. 504 p. (In Russ.).
 13. He Y., Hiu J., Guan X. Radar data processing with applications. John Wiley & Sons, Inc. 2016. 536 p.
 14. Dahmani M., Meche A., Keche M., Ouamri A. A new decoupled unbiased converted measurement adaptive $\alpha\beta$ filter developed for target tracking. 2017 Seminar on Detection Systems Architecture and Technologies (DAT). 2017. pp. 1–6.
 15. Kumar R.S.R., Ramaiah M.V., Kumar J.R. Performance comparison of α - β filter and kalman filter for CA, NCA target tracking using bistatic range and range rate measurements. 2014 International Conference on Communications and Signal Processing (ICCSP). 2014. pp. 1462–1466.
 16. Vinaykumar M., Ravi Kumar J. Performance evaluation of Alpha-Beta and Kalman filter for object tracking. 2014 IEEE International Conference on Advanced Communications, Control and Computing Technologies. 2014. pp. 1369–1373.

Л.Ф. НОЖЕНКОВА, О.С. ИСАЕВА, А.А. ЕВСЮКОВ
**ИНСТРУМЕНТЫ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ
КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Ноженкова Л.Ф., Исаева О.С., Евсюков А.А. **Инструменты компьютерного моделирования функционирования бортовой аппаратуры космических систем.**

Аннотация. В статье описан инструментальный программный комплекс, позволяющий строить, выполнять и интегрировать имитационные модели функционирования бортовой аппаратуры космических систем. В основу положена технология повторного использования, определенная в международном стандарте Simulation Model Portability (SMP2). Наряду с реализацией стандартных правил построения интегрируемых моделей разработаны дополнительные оригинальные средства информационно-графического и интеллектуального моделирования. Таким образом, обеспечиваются возможности графически строить модели архитектуры бортовых систем, задавать методы функционирования моделей и определять варианты выполнения команд управления бортовой аппаратурой.

Работы ведутся в рамках создания программного обеспечения проблемно-ориентированной инфраструктуры имитационного моделирования в космической отрасли. Разработанный программный комплекс позволит конструкторам не только строить собственные модели бортовых систем, но и объединять имитаторы устройств различных производителей, проводить имитационные эксперименты для подготовки и анализа технических проектов. Предложенный подход обеспечивает экономические и технологические преимущества для развития наукоемкого производства космической техники.

Ключевые слова: инфраструктура имитационного моделирования, simulation model portability standard, космический аппарат, бортовая аппаратура, командно-измерительная система.

1. Введение. Неотъемлемой частью научно-технической деятельности в современном мире становятся технологии компьютерного моделирования. Проведение экспериментальных исследований сложных технических систем, как правило, связано с экономическими и технологическими трудностями. В этой связи увеличивается роль программных инструментов, позволяющих моделировать технические системы до их изготовления и в дальнейшем использовать построенные модели при разработке и эксплуатации оборудования.

Реализация сложных проектов в космической отрасли, как правило, предполагает сотрудничество множества компаний. Для имитационного моделирования технических объектов, состоящих из подсистем, изготавливаемых разными производителями, необходимы программные инструменты, позволяющие не только строить собственные имитаторы, но и интегрировать сторонние модели в комплексное решение. Обеспечение переносимости моделей разных производителей и органи-

зация их взаимодействия базируются на технологиях повторного использования (Simulation-Oriented Model Reuse, SOMR) [1]. В мировой практике научных исследований в настоящий момент такие технологии набирают все большую популярность. Их применение способствует повышению эффективности моделирования и достоверности результатов. Реализация технологий повторного использования продвигается в двух актуальных направлениях: разработки моделей повторного использования на основе существующих технологий и методов; создания прикладных систем моделирования или сред, включающих инструменты повторного использования моделей.

Целью исследования, представленного в данной статье, является разработка программных инструментов, позволяющих строить, интегрировать и совместно использовать имитационные модели бортовой аппаратуры космических систем. Работы ведутся в рамках создания проблемно-ориентированной инфраструктуры имитационного моделирования в космической отрасли. Под инструментами понимаются подсистемы программного комплекса, предназначенного для проектирования, разработки, интеграции и использования имитационных моделей. В их числе инструменты информационно-графического моделирования, интеллектуального моделирования [2] и инструменты интеграции имитационных моделей на основе технологии переносимости и повторного использования. Программный комплекс предназначен для имитации командно-программного управления бортовой аппаратурой космических систем.

Представляемые инструменты информационно-графического моделирования позволяют в графическом виде задавать структуру моделируемой системы, визуализировать в процессе проведения имитационных экспериментов передачу пакетов команд и импульсов, выполнять формирование и анализ телеметрической информации. Отображение структуры моделируемой системы информационно-графической моделью расширяет возможности использования модели в качестве средства передачи знаний об устройстве системы, делает модель наглядной и позволяет легко ее модифицировать. Популярные средства моделирования, такие как AnyLogic, Mathlab Simulink [3, 4], также обладают графическими инструментами. Кроме того, существуют графические среды разработки технических объектов, например LabView (Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench) [5]. Однако модели, построенные с их помощью, значительно перегружены из-за универсальности средств и необходимости использования функциональных блоков, предназначенных для обеспечения самих процессов моделирования, визуализации, ввода и вывода данных. В нашем

случае модель отображает структуру бортовых устройств без включения дополнительных элементов. Важно то, что перечисленные среды моделирования напрямую не поддерживают технологии повторного использования имитационных моделей.

Инфраструктуры моделирования, построенные на основе стандартов переносимости имитационных моделей (Simulation Model Portability, SMP2) [6] также, на наш взгляд, обладают существенным недостатком: для графического представления моделей в них используется язык UML [7], однако для моделирования функционирования бортовой аппаратуры недостаточно UML нотации. Предложенные нами инструменты графического моделирования структуры бортовых систем и коммутационных интерфейсов позволяют решать задачи имитации функционирования, а именно, приема-передачи данных по различным каналам связи.

Методы построения моделей в различных средах разнятся. Стандарт SMP2 определяет использование программных моделей, написанных на языке C++. Однако для специалистов предметной области создание таких моделей затруднительно. Нами предложены программные инструменты интеллектуального моделирования, которые позволяют в интерактивном режиме создавать правила функционирования модели, описывающие логику взаимодействия бортовых систем в терминах предметной области. Это значительно облегчает построение моделей. По сравнению с работами других авторов, применяющих интеллектуальные методы для моделирования космической техники [8], наши исследования существенно расширяют возможности инструментов моделирования за счет реализации технологии переносимости, что дает возможность их использования в инфраструктурах имитационного моделирования.

Анализируя состояние работ по использованию инструментов компьютерного моделирования специалистами космической отрасли, мы пришли к выводу, что наиболее широко применяется среда разработки виртуальных приборов LabView. Под виртуальным прибором (Virtual Instruments) в идеологии LabView понимаются программные модули, реализующие различные функции оборудования [5]. Виртуальные приборы целесообразно использовать и для построения комплексных моделей. Поэтому нами также была поставлена и решена задача интеграции виртуальных приборов с другими типами моделей [9].

В статье представлены результаты исследования существующих подходов к организации программных систем с технологией повторного использования и собственный инструментальный комплекс имитационного моделирования. Применительно к задаче моделирования командно-программного управления бортовой аппаратурой космического аппарата разработанные программные инструменты информационно-

графического и интеллектуального моделирования позволяют в интерактивном режиме создавать правила функционирования модели, описывающие логику взаимодействия бортовых систем космического аппарата. Описаны инструменты интеграции виртуальных приборов, интеллектуальных моделей и SMP моделей в рамках единой программной платформы, поддерживающей технологию переносимости.

2. Задача моделирования командно-программного управления бортовой аппаратурой. Моделирование командно-программного управления бортовой аппаратурой заключается в имитации функционирования систем космического аппарата и функций наземного комплекса управления при приеме и обработке команд. Функционирование модели может быть описано как последовательность действий программных имитаторов.

На рисунке 1 приведена схема информационного взаимодействия программных имитаторов при моделировании командно-программного управления бортовой аппаратурой.

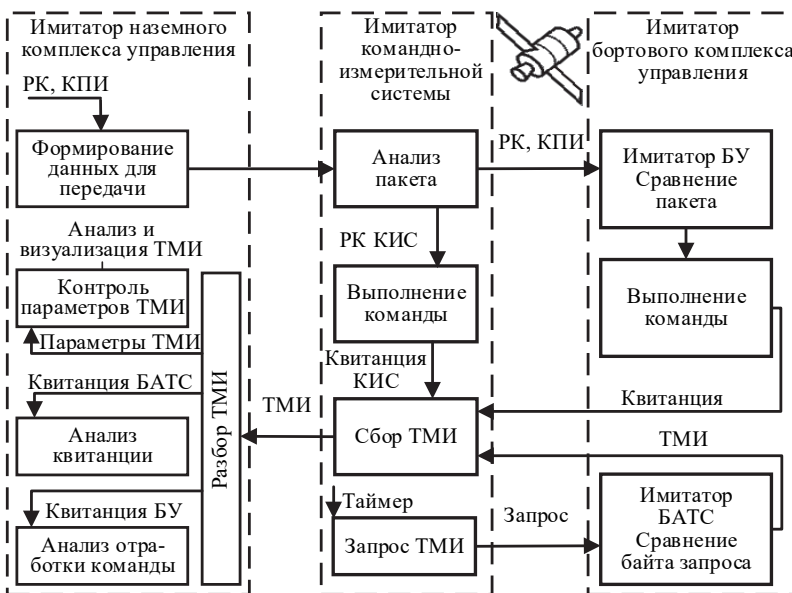


Рис. 1. Схема моделирования командно-программного управления бортовой аппаратурой

На рисунке введены следующие сокращения, принятые в предметной области: РК — радиокomанда, КПИ — командно-программная информация, ТМИ — телеметрическая информация, БАТС – бортовая аппаратура телесигнализации, БУ — бортовые устройства, КИС — командно-измерительная система.

Схема описывает порядок действий, который необходимо реализовать в имитационной модели. Программный имитатор наземного комплекса управления выполняет передачу команды в имитатор командно-измерительной системы космического аппарата. Командно-измерительная система в своем составе содержит приемо-передающие устройства и обеспечивает взаимодействие между наземным и бортовым комплексами управления. Ее назначение — прием и передача различных видов информации с наземного комплекса, формирование и передача на космический аппарат команд и программ управления, стандартных частот и сигналов времени для синхронизации работы бортового оборудования, а также для поддержки режима измерения параметров движения космического аппарата. Информационный обмен между бортовыми системами и наземным комплексом управления осуществляется при помощи следующих типов данных: радиокоманд, командно-программной информации и пакетов телеметрической информации. Для моделирования требуется повторить все режимы работы командно-измерительной системы. Для обеспечения унификации данных используются стандарты Европейского космического агентства: стандарт ESAPSS-04-107 описывает формат телекоманд, ESAPSS-04-106 — формат телеметрической информации.

Получив команду, командно-измерительная система ее анализирует, формирует квитанцию и передает в составе телеметрической информации. Команда выполняется либо передается в программный имитатор бортового комплекса управления. Выполняя команду, командно-измерительная система изменяет состояние оборудования своих подсистем. Имитатор бортового комплекса управления, получив команду, выполняет ее, формирует ответ и добавляет его в телеметрическую информацию. За формирование телеметрической информации бортовых систем отвечает бортовая аппаратура телесигнализации, а за ее передачу — командно-измерительная система и приемо-передающие устройства. Кроме того, командно-измерительная система, собирая телеметрическую информацию бортовых систем, дополняет ее своими квитанциями. Поступающая в наземный комплекс управления телеметрическая информация разбирается и анализируется. Телеметрическая информация позволяет делать вывод о прохождении и обработке команд, а также о состоянии бортовых систем.

Для реализации приведенной схемы моделирования необходимо совместить разные технологические подходы, позволяющие построить комплексную модель из технологически разнородных элементов. С одной

стороны, в комплексную модель могут входить модели устройств от производителей оборудования, построенные по принципу переносимости моделей стандарта SMP2 (SMP модели), а с другой стороны, комплексная модель, как правило, включает собственные разработки проектирующего предприятия или модели, построенные в известных системах, чаще всего в LabView. При этом для успешной реализации часть моделей может быть представлена схематично, только на уровне логики функционирования, а другая часть реализована более детально с учетом физических характеристик, свойств передаваемых сигналов, линий связи и прочего.

Данная схема моделирования может использоваться при наземных испытаниях оборудования бортовых систем космического аппарата [10]. В этом случае имитатор испытываемого оборудования в схеме заменяется реальным устройством.

3. Инструменты информационно-графического моделирования. Для построения структуры моделей авторы предлагают инструменты информационно-графического моделирования. В существующих инфраструктурах имитационного моделирования применяются инструменты графического и неграфического моделирования, которые создают C/C++ код. Например, язык моделирования Modelica [11] позволяет создавать структурные элементы модели и в дальнейшем определять поведение модели, используя графический инструмент моделирования, такой как Dymola. Компилятор Modelica генерирует C++ код модели.

Разрабатывая собственные инструменты графического моделирования, авторы старались, с одной стороны, наиболее полно учесть специфику решаемых задач предметной области, с другой стороны — создать удобные высокоуровневые средства для наглядного построения моделей. Построение модели заключается в визуальном размещении, настройке конфигурации блоков модели, представляющих аппаратную часть бортовых систем, и задании коммутационных интерфейсов, связей и параметров моделируемого оборудования.

На рисунке 2 показан пример графического представления модели командно-программного управления бортовой аппаратурой космических систем. Блоки графической модели отображают различные элементы оборудования, поля в блоках — интерфейсы физических устройств, линии между блоками — коммутационные соединения, стрелки — направления передачи данных.

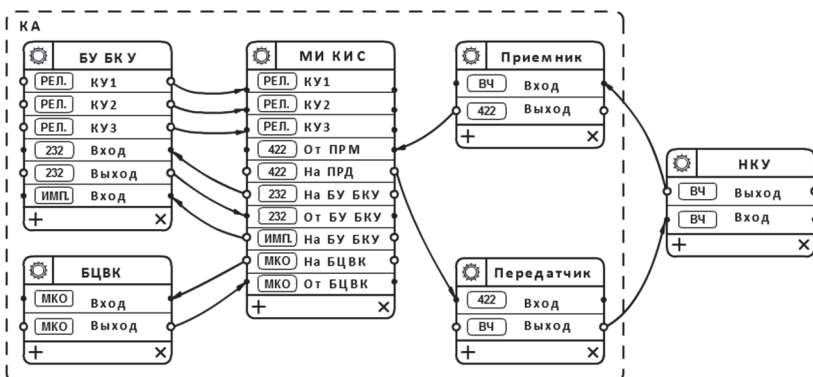


Рис. 2. Графическая модель для имитации командно-программного управления бортовой аппаратурой

Обозначения, введенные на рисунке 2: БУ БКУ — бортовое устройство бортовой комплекс управления, БЦВК — бортовой цифровой вычислительный комплекс, МИ КИС — интерфейсный модуль командно-измерительной системы космического аппарата, НКУ — наземный комплекс управления, КУ — команда управления. Типы коммутационных интерфейсов, используемые в примере: РЕЛ — релейный, 232 — RS-232 (Recommended Standard 232), ИМП — импульсный, 422 — RS-422 (Recommended Standard 422), ВЧ — высокочастотный интерфейс. В графической модели определены основные блоки, имитирующие бортовые системы. Для приема и передачи команд, а также анализа телеметрической информации предназначен имитатор наземного комплекса управления. Имитационные модели могут усложняться включением в них дополнительных элементов и резервных блоков. Модель имеет набор параметров и характеристик, изменяя которые, можно задавать различные варианты конфигурации бортовой аппаратуры космических систем.

Программные инструменты позволяют создавать базы команд и пакеты телеметрической информации произвольной структуры, задавать методы их формирования, передачи и анализа. На рисунке 3 показан редактор пакетов данных, который позволяет формировать базу команд. Обозначения на рисунке: РК — радиокманда, БУ БКУ — бортовое устройство бортовой комплекс управления.

Структуры команд и методы их отработки в имитационной модели могут меняться, что позволяет выявлять различные особенности функционирования бортовых систем.

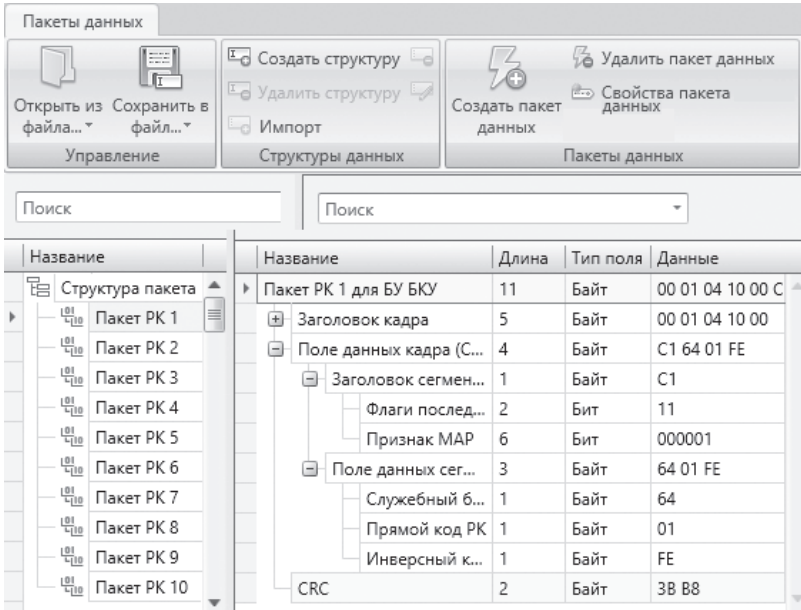


Рис. 3. Редактор пакетов данных

Для каждого элемента модели может быть выполнена графическая детализация. Уровень детализации зависит от целей и задач моделирования. На рисунке 4 показан пример графической детализации модели передатчика.

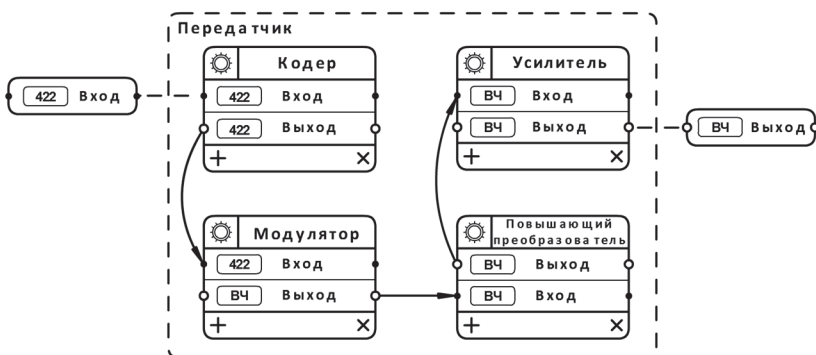


Рис. 4. Графическая детализация элемента модели

Детализация позволяет исследовать особенности приемо-передающего тракта моделируемой системы, имитируя преобразование двоичного пакета в передаваемый в бортовые устройства сигнал. Модель содержит имитаторы кодера, модулятора, преобразователя и усилителя. Выполнение декомпозиции имитатора приемника реализует полную цепочку преобразования данных при передаче, что позволяет моделировать расчет ошибок и потерь на тракте при различных заданных внешних воздействиях.

Тесная интеграция графических инструментов и среды моделирования позволяет использовать графическое представление как при разработке моделей, так и при проведении имитационных экспериментов. Визуальное формирование модели из графических элементов дает существенные преимущества за счет простоты и наглядности проектирования бортовой аппаратуры, анализа и отладки проектных решений.

4. Инструменты интеллектуального моделирования. Инструменты интеллектуального моделирования позволяют задавать правила функционирования отдельных элементов модели и логику взаимодействия между ними в терминах предметной области.

Каждое правило задается символьной конструкцией вида: *Если A то B*, где *A* — условие, *B* — действие. Условие *A* определяет, при каком состоянии элементов модели данное правило может быть применено. Правая часть правила *B* задает действия, определяющие соответствующий шаг решения задачи или способ изменения состояния модели. Условия и действия представляют собой выражения над переменными, заданными в информационно-графической модели, либо функции, изменяющие состояние модели.

Для формирования базы правил разработан редактор, пример его работы показан на рисунке 5. Созданы словарь фактовых переменных и справочник их возможных значений. Диапазоны значений переменных задаются в соответствии со спецификацией оборудования, определенной в технической документации. Словарь может расширяться пользователем. При модификации базы знаний выбираются переменные из словаря, и выполняется контроль допустимых значений. Использование такого подхода позволяет избежать ошибок синтаксиса и структуры правил.

Правила описывают различные варианты взаимодействия элементов графической модели для имитации поведения реального оборудования. Для апробации программных инструментов разработаны информационно-графическая модель и база знаний на основе технической документации на бортовую аппаратуру командно-измерительной системы космического аппарата. Информационно-графическая модель включает командно-измерительную систему и имитаторы окружения: наземного и

бортового комплексов управления. База содержит правила функционирования бортовой аппаратуры, взаимодействия с сопряженными устройствами и поддержки внешнего командно-программного управления.

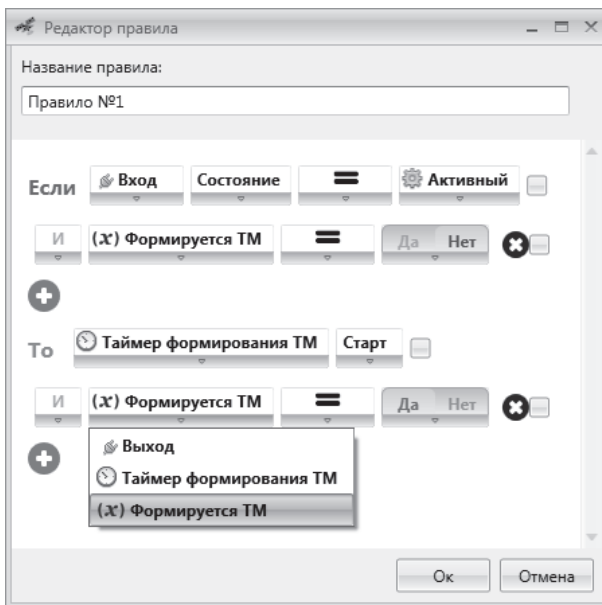


Рис. 5. Редактор базы правил

База знаний использует структуры команд и телеметрической информации, реализованные в реальном оборудовании. Разработка модели была выполнена до поступления от производителя готового оборудования. Проведение имитационных экспериментов позволило наглядно представить методы функционирования бортовой аппаратуры, разработать структуры данных и подготовить программы испытаний. Созданные в имитационной модели база команд и структура телеметрического кадра применялись в дальнейшем при испытаниях командно-измерительной системы. Кроме того, модели окружения командно-измерительной системы легли в основу построения программных имитаторов, предназначенных для проведения автономных испытаний. База знаний дорабатывалась в процессе проведения испытаний бортовой аппаратуры командно-измерительной системы. Построение базы знаний на основе технической документации и дальнейшая ее доработка по результатам про-

веденных испытаний бортовой аппаратуры позволили выявить особенности реализации оборудования, не указанные производителем в спецификации и других документах.

База знаний имеет модульную реализацию. В каждом модуле представлены правила, относящиеся к одному элементу графической модели, представляющему бортовое оборудование. Такой подход обусловлен поведением моделируемых систем, функционирование которых определяется собственной логикой. Влияние сопряженных устройств возможно только на уровне данных, сигналов, импульсов или изменений других параметров, поступающих на входные интерфейсы. Модули базы знаний содержат правила общего назначения, правила выдачи командной и командно-программной информации на системы космического аппарата, формирования запросов телеметрической информации, управления и контроля состояния бортовой аппаратуры, задания режимов и интерфейсов передачи данных и пр. Поддерживаемая модульностью позволяет добавлять, удалять или модифицировать отдельные правила без изменения логики работы независимых элементов модели. При построении базы знаний существенную роль в достижении ее корректности обеспечивает тесная интеграция с графическим представлением процесса моделирования. Проведение имитационных экспериментов с визуализацией на графической модели и сопоставление результатов моделирования с техническими документами позволили конструктору оценить полноту и непротиворечивость базы знаний. В текущей реализации дополнительные методы верификации базы знаний не предусмотрены.

Для наглядности восприятия базы знаний специалистом предметной области созданные правила интерпретируются в конструкции, приближенные к естественно языковым. Примеры правил приема, передачи, отработки команд, поступающих от наземного комплекса управления, в бортовые системы приведены далее:

Правило 1:

Если интерфейс «Вход» принял «Команду»

И тип команды = «Команда МИ КИС»

И значение команды = «Включить ПРМ»

То выдать импульс на вход «Управление ПРМ»

Правило 2:

Если интерфейс «Вход» принял «Команду»

И значение команды = «Рестарт»

То комплект МИ КИС = Основной

И Скорость формирования ТМИ = 1000 бит/с

Правило 3:

Если таймер «Формирование ТМИ» в состоянии «Активный»
То передать массив данных «ТМИ» на вход «БУ БКУ»

В приведенных примерах правил используются следующие обозначения: БУ БКУ — бортовой комплекс управления, МИ КИС — интерфейсный модуль командно-измерительной системы, ПРМ — приемопередающее устройство, ТМИ — телеметрическая информация, Команда — массив байт заданной структуры, определяющий радиокоманду в соответствии с техническим заданием на бортовое оборудование.

Помимо моделирования определенных действий, связанных с прохождением команд, правила позволяют имитировать реакции системы на условия функционирования и выполнять контроль значений параметров. Примеры правил, описывающих реакции командно-измерительной системы на изменения параметров «Напряжение питания» и «Максимальный ток потребления» приведены далее:

Правило 4:

Если Напряжение питания < 21 В

То Питание = Выкл

Правило 5:

Если Максимальный ток потребления $> 0,3$ А

То Сервисное сообщение = «Недопустимое значение»

Значения параметров могут меняться в процессе моделирования. Такие правила позволяют моделировать нештатные ситуации и предназначены для анализа действий реального оборудования при испытаниях. База знаний представляет собой хранилище функциональных и технологических процессов, позволяющих не только наблюдать, но и управлять логическим выводом. Сценарии функционирования моделей, возмущающие воздействия внешней среды на элементы бортовой аппаратуры, вызывающие сбои работы оборудования, ошибки, связанные с потерями на линиях связи, задаются правилами в базе знаний. Однако такой способ не универсален, поскольку влияние распространяется на всю модель и не может изменяться в процессе проведения имитационных экспериментов. Данный вопрос будет прорабатываться в дальнейшем.

На рисунке 6 показан пример описания модели, которая реализована средствами интеллектуального моделирования. Модель имеет графическое представление, набор параметров, базу правил и таймеры, управляющие логическим выводом или вызывающие действия по изменению состояния модели. Из реализаций отдельных моделей оборудования строится комплексная модель. Состояние каждой модели представляется как совокупность параметров, значений таймеров, фактовых переменных, данных на входах коммутационных интерфейсов.



Рис. 6. Пример логической модели командно-измерительной системы

Для имитационного моделирования реализован классический алгоритм логического вывода, дополненный возможностью выполнения правил по таймерам. Применение таймеров позволяет имитировать временные характеристики работы оборудования, например, формирование и передачу телеметрической информации с периодичностью, заданной в технической документации. На каждом шаге моделирования выбираются действия, определяемые набором продукционных правил, применимых к текущему состоянию модели. Выполнение действий изменяет состояние модели в зависимости от принятых пакетов данных, активизирует таймеры или вызывает процесс передачи пакетов через заданный в модели интерфейс.

Алгоритм логического вывода показан на рисунке 7. Алгоритм используется при имитационном моделировании функционирования бортовых систем. Реализация логического вывода выполнена на основе агентного подхода, где каждый агент отвечает за функционирование отдельной модели, выполняя прямую цепочку вывода на основе набора продукционных правил.

В момент старта имитационного моделирования программное обеспечение собирает данные о состоянии моделей и запускает таймеры. Правила разбиты на модули, описывающие отдельные бортовые устройства. Для управления связями между ними построена таблица коммутации. Она содержит информацию об интерфейсах моделей и способах их соединения для обеспечения информационного взаимодействия. Поступление на входной интерфейс какой-нибудь из моделей данных, представ-

ляющих радиокоманды или командно-программную информацию, вызывает изменение состояния моделей. Для каждой модели изменение ее состояния запускает программного агента, который выполняет сопоставление с базой знаний набора фактовых переменных, имеющих значения определенные для данного состояния модели. В результате сопоставления выбираются правила, применимые к текущему состоянию модели, формируется конфликтный набор (КН). Выполнение выбранных правил изменяет состояние модели. В случае, если в определенный момент времени в базе знаний не находится правил, применимых к текущему состоянию модели, логический вывод останавливается, программный агент переходит в режим ожидания.

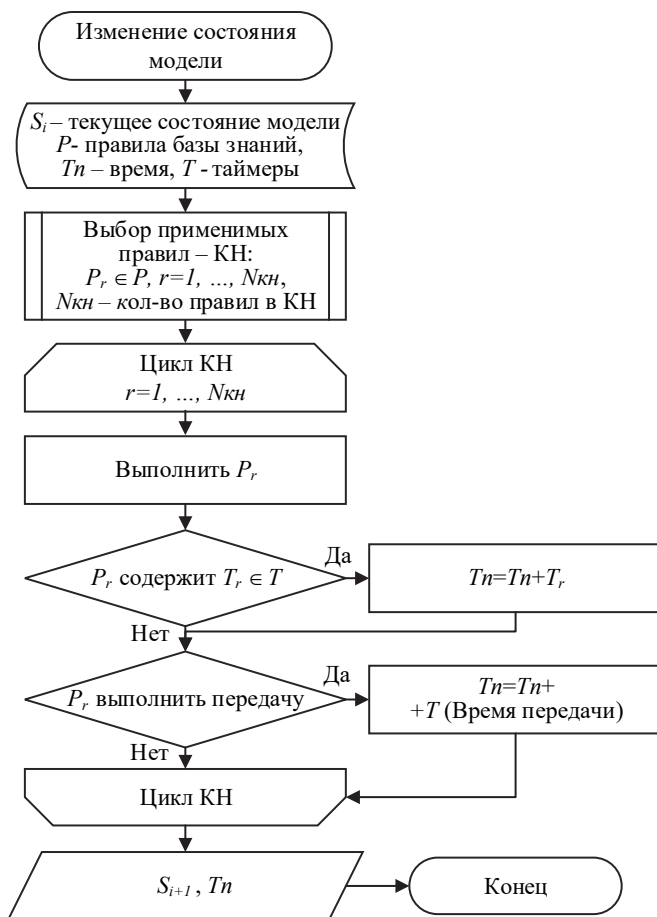


Рис. 7. Алгоритм логического вывода

Для визуализации имитационного моделирования применяется графическая модель, на которой отражаются изменение состояния и активности элементов модели, а также формирование и передача пакетов данных через коммутационные интерфейсы. Созданные модели предназначены для исследования особенностей функционирования бортовых систем. Для улучшения восприятия конструктором процесса моделирования введен коэффициент замедления работы модели, что позволяет наблюдать одновременное выполнение нескольких процессов.

Если построение имитационных моделей выполняется в соответствии с технической документацией на уже созданное оборудование, то такая модель является основой для проведения его испытаний. В этом случае характеристики элементов модели предназначены для оценки параметров функционирования оборудования, контроля результатов испытаний на основе эталонных критериев, формирования реакций при выходе за граничные условия, а также формирования рекомендаций по детализации процесса испытаний.

Представленный способ задания методов моделирования в виде правил нагляден и понятен специалисту предметной области. Инструменты интеллектуального моделирования наряду с графическими инструментами обеспечивают высокий уровень проблемной ориентации инфраструктуры имитационного моделирования. Они позволяют конструктору оперировать привычными семантическими конструкциями для построения моделей функционирования бортовой аппаратуры космических систем [12]. Представленные программные инструменты апробированы при конструировании командно-измерительной системы на предприятии-изготовителе спутниковых систем [13].

5. Инструменты интеграции имитационных моделей на основе стандарта SMP2. Реализация функций отдельных элементов модели может выполняться в виде правил (condition-action rules), виртуальных приборов, созданных в среде Labview, или подключаемых программ на C++. Если для моделирования бортового устройства существенное значение имеет его программная реализация, требуется поддержка дополнительных способов представления моделей. Для построения комплексных решений и обеспечения совместного использования различных реализаций моделей разработаны программные инструменты интеграции.

Существует целый ряд международных стандартов, определяющих правила построения систем имитационного моделирования, которые обеспечивают реализацию технологий повторного использования имитационных моделей. В работе [14] проведен обзор некоторых стандартов,

поддерживающих данную технологию. Стандарт «High Level Architecture» (HLA) (IEEE 1516) определяет архитектуру распределенных систем имитационного моделирования. Первоначально он разрабатывался для потребностей военной отрасли. Его разработчик — Department of Defense, Defense Modeling and Simulation Office. Еще один стандарт, предназначенный для военных целей, — «Distributed Interactive Simulation» (DIS) (IEEE 1278). DIS – это открытый стандарт для сопровождения взаимодействия моделей реального времени на распределенных системах. Универсальный стандарт «The Foundation for Intelligent Physical Agents» предназначен для агентного моделирования.

В космической отрасли базовым технологическим стандартом, определяющим правила построения систем имитационного моделирования, является стандарт Европейского космического агентства «Simulation Model Portability» (текущая редакция SMP2) [6]. Программную среду, реализующую стандарт SMP2, называют инфраструктурой имитационного моделирования (Simulation Infrastructure) [15]. В работе [16] отмечается, что стандарты Европейского космического агентства обеспечивают нормативную основу, определяющую информационные элементы и программные компоненты, которые необходимо сформировать для построения собственной инфраструктуры имитационного моделирования.

Стандарт SMP2 нашел широкое применение. На его основе построены такие инфраструктуры, как SimSAT Европейского космического агентства [17], SimTG — Astrium Satellites [18], симулятор центра управления полетами на основе SWARMSIM [7], программное обеспечение южнокорейского института аэрокосмических разработок [19] и др. Несмотря на общий подход, вопросы построения моделей в каждом из приведенных примеров решаются оригинальными методами. Либо имитационные модели строятся в системах моделирования, не поддерживающих стандарт, затем используются инструменты интеграции с SMP системами, такие, например, как программный комплекс MOSAIC, выполняющий автоматическую передачу моделей MATLAB/Simulink в SMP2-стандарт [20].

Среди работ, использующих инфраструктуру имитационного моделирования на основе стандарта SMP2, стоит отметить крупный научно-исследовательский проект MERLIN [21]. Проект направлен на разработку спутников дистанционного зондирования для мониторинга парникового газа. Это франко-германский проект партнерства, «состоящего из обороны и космоса»: Airbus, CNES и Thales Alenia Space. Применение SMP2 позволило выполнить стандартизацию всех компонентов пространственной системы, сделать их более надежными, снизить затраты и оптимизировать график разработки. Уникальность проекта

MERLIN заключается в интеграции имитационных моделей, разрабатываемых исследователями на четырех различных SMP2 платформах имитационного моделирования. Положительный опыт этих исследований показывает актуальность и эффективность построения имитационных моделей на основе стандарта SMP2.

В России исследования по моделированию сложных технических комплексов и систем проводятся в различных прикладных направлениях, в том числе в области космического приборостроения [22, 23]. В работах российских исследователей для моделирования сложных технических комплексов в основном используются системы аналитического и имитационного моделирования, такие как AnyLogic [24], MATLAB, Arena, GPSS, Extend, iThink Analyst, Process Model, MvStadium и другие [25, 26], либо создаются собственные инструменты [27, 28]. Всесторонние исследования, направленные на создание ответственных программных продуктов, поддерживающих технологию повторного использования, необходимы для поддержки импортонезависимости российских космических разработок.

Представленный в настоящей работе инструментальный комплекс имитационного моделирования предназначен для построения моделей бортовой аппаратуры и их апробации на предприятии-изготовителе спутниковых систем. Модель командно-программного управления бортовой аппаратурой космических систем объединяет модели отдельных подсистем. Полученная в результате интеграции комплексная модель должна обеспечивать исследование поведения моделируемого объекта в целом и влияния составных частей друг на друга, при этом она должна быть легко модифицируема и расширяема.

Для интеграции моделей их различные реализации приводятся к унифицированному виду, что позволяет применять одни и те же подходы и программные инструменты подготовки и выполнения имитационных экспериментов к различным реализациям моделей. Для всех моделей создается автоматическая или загружается при импорте метамодель, написанная на формальном языке Simulation Model Definition Language (SMDL) [29]. В соответствии со стандартом SMP2 метамодель содержит структуры каталога, конфигурации, сборки, планировщика, а также реализацию методов моделирования в виде бинарных файлов. Инструменты информационно-графического моделирования позволяют дополнять модели структурами команд и телеметрии, определять интерфейсы приема-передачи данных, а также задавать коммутационные соединения и направления информационного взаимодействия.

Приведение различных реализаций моделей к единым компонентам проблемно-ориентированной среды моделирования позволяет конструктору бортовой аппаратуры строить имитационные модели, применяя различные варианты их реализаций. Вне зависимости от того, реализованы ли функции модели на специализированном языке программирования, или описаны в виде правил, пользователь может оперировать ими одинаково. Различия реализаций для него будут видны только в виде пиктограмм элементов графической модели. Схематично эта идея показана на рисунке 8.

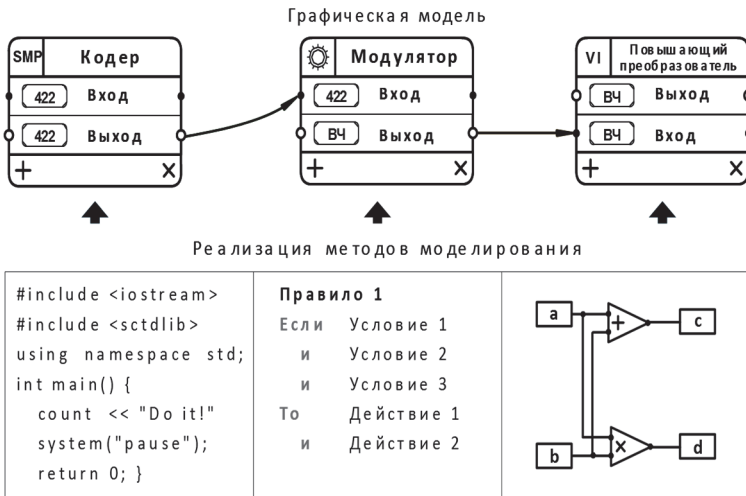


Рис. 8. Представление элементов комплексной модели

Так, например, для построения комплексной модели командно-программного управления бортовой аппаратурой требуется выполнить реализацию моделей бортовых устройств, командно-измерительной системы и приемо-передающего оборудования. Предположим, что методы моделирования имитатора бортовых устройств реализованы на C++, имитатор командно-измерительной системы выполнен на основе базы правил, а для моделирования приемо-передающего устройства используются виртуальные приборы, реализованные в среде LabVIEW. После интеграции этих моделей в инфраструктуре пользователь оперирует их графическим представлением независимо от способа реализации. Сама реализация моделей скрыта от пользователей и все функции по выполнению моделей и их взаимодействию берет на себя инфраструктура имитационного моделирования. Выполнение моделей происходит с помощью механизмов стандарта SMP2, среди них хранитель

времени (Time Keeper), планировщик (Scheduler), система логирования (Logger), менеджер событий (Event Manager), реестр ссылок (Link Registry), система вызова моделей (Resolver).

Для всех типов моделей в инфраструктуре поддерживается система каталогов, которая представляет собой описание пространства имен, типов данных, структур, классов и интерфейсов. Кроме того, в каталоге определяются типы событий для межмодельного взаимодействия. На основе различных экземпляров модели выполняется сборка. Это один из атрибутов, описанных в стандарте и предназначенных для задания конфигурации экземпляров моделей. Ход выполнения имитационных экспериментов задается в планировщике. Для моделей SMP2 он формируется по SMDL-описанию. Для других типов моделей, включая комплексные, он задается инструментами инфраструктуры. Планировщик определяет последовательности вызовов моделей и методы перехода между состояниями имитационного моделирования. Управление ходом моделирования в процессе имитационных экспериментов также входит в функции планировщика. Реализация модели зависит от ее типа и задается в виде бинарного кода, правил базы знаний или библиотеки виртуальных приборов.

Интеграция имитационных моделей на основе стандарта SMP2 позволяет получать разнообразные и качественные решения, используя знания групп инженеров, имеющих большой опыт проектирования бортовой аппаратуры. Создание инфраструктуры имитационного моделирования на основе стандарта SMP2 для предприятий-производителей космического оборудования позволит российским разработкам легко интегрироваться в международные проекты. Авторы надеются, что работы по созданию инфраструктуры имитационного моделирования на основе стандарта SMP2 будут способствовать развитию технологий переносимости имитационных моделей в российском научном сегменте.

7. Заключение. Разработан инструментальный программный комплекс для поддержки имитационного моделирования бортовой аппаратуры космических систем. Программный комплекс позволяет строить, исполнять и интегрировать имитационные модели бортовых систем космических аппаратов. В основу положена технология повторного использования, определенная в международном стандарте Simulation Model Portability (SMP2). Оригинальные средства информационно-графического и интеллектуального моделирования обеспечивают наглядность и доступность процесса формирования моделей архитектуры и функционирования бортовых систем. Разработанный программный комплекс позво-

ляет конструкторам не только строить собственные модели, но и объединять имитаторы устройств разных производителей, проводить имитационные эксперименты для подготовки и анализа технических проектов.

Такая интеграция обеспечивает композицию моделей разных производителей оборудования в единый имитационный комплекс. Так, представленные инструменты позволили построить комплексную имитационную модель командно-программного управления бортовой аппаратурой космического аппарата путем интеграции SMP моделей бортовых устройств, интеллектуального имитатора командно-измерительной системы и виртуальных приборов для моделирования приемо-передающих устройств. Допускается использование имитаторов в сочетании с реальной аппаратурой, например, при проведении ее испытаний.

Применение инструментов имитационного моделирования на предприятии-изготовителе спутниковых систем позволит повысить качество и обоснованность конструкторских решений на различных этапах жизненного цикла производства космической техники и будет способствовать накоплению и передаче знаний об устройстве бортовой аппаратуры. Предложенный подход обеспечивает экономические и технологические преимущества для развития наукоемкого производства космической техники.

Литература

1. Liu Y., Zhang L., Zhang W., Hu X. An overview of simulation-oriented model reuse // Theory, methodology, tools and applications for modeling and simulation of complex systems. 2016. vol. 646. pp. 48–56.
2. Nozhenkova L., Isaeva O., Gruzenko E. Computer Simulation of Spacecraft Onboard Equipment // ACSR-Advances in Computer Science Research. 2015. vol. 18. pp. 943–945.
3. AnyLogic 7.2 Released – AnyLogic Simulation Software. URL: www.anylogic.com (дата обращения: 02.06.2016).
4. Schmidt A., Durak U., Pawletta T. Model-based testing methodology using system entity structures for Matlab/Simulink models // SIMULATION: Transactions of the society for modeling and simulation international. 2016. vol. 92-8. pp. 729–746.
5. Bress T. Effective LabView Programming // NTS Press. 2013. 720 p.
6. Simulation modelling platform. ECSS E-40-07 // ESA Requirements and Standards Division ESTEC. The Netherlands. 2011. 49 p.
7. Friizen P., Segneri D., Pignede M. SWARMSIM – The first fully SMP2 based Simulator for ESOC // Proceedings of the 11th International Workshop on Simulation & EGSE facilities for Space Programmes. ESTEC. 2010. 8 p.
8. Eickhoff J. Simulating Spacecraft System // Springer. 2009. 353 p.
9. Nozhenkova L., Isaeva O., Gruzenko E., Markov A. Problem-oriented integration of SMP-models in the simulation modeling infrastructure // Advances in Intelligent Systems Research. 2017. vol. 141. pp. 121–124.
10. Nozhenkova L.F., Isaeva O.S., Vогorovskiy R.V. Command and Software Control Simulation for Testing Spacecraft Onboard Equipment // International Conference on Advanced Manufacture Technology and Industrial Application. 2016. pp. 349–353.

11. *Schamai W., Fritzsom P., Paredis C.* Translation of UML State Machines to Modelica: Handling Semantic Issues // *Simulation*. 2013. pp. 498–512.
12. *Nozhenkova L.F. et al.* Unified description of the onboard equipment model on the basis of the «Simulation Model Portability» standard // *Advances in Intelligent Systems Research*. 2016. vol. 133. pp. 481–484.
13. *Ноженкова Л.Ф. и др.* Комплексная поддержка конструирования бортовых систем контроля и управления космических аппаратов на основе интеллектуальной имитационной модели // *Информационные технологии*. 2015. № 9. С. 706–714.
14. *Лопаткин Р.Ю., Петров С.А., Игнатенко С.Н., Иващенко В.А.* Перспективы применения имитационного моделирования в задачах автоматизации и управлении технологическими системами // *Вісник НТУ «ХП»*. Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. 2015. № 17(1189). С. 61–71.
15. *Arguello L., Miró J., Gujer J., Nergaard K.* SMP: A Step Towards Model Reuse in Simulation // *ESA Bulletin*. 2000. pp. 108–112.
16. *Eito-Brun R.* Design of an Ontologies for the Exchange of Software Engineering data in the Aerospace Industry // *Communications in Computer and Information Science*. 2016. vol. 649. pp. 71–78.
17. *Sarkarati M., Merri M., Spada M.* Cloud based architectures in ground systems of space missions // *GSW 2013*. ESA. 2013. 14 p.
18. *Cazenave C., Arrouy W.* Implementing SMP2 standard within SimTG simulation infrastructure // *SESP 2012: Simulation and EGSE for space programmes*. ESTEC. Noordwijk. 2012. 13 p.
19. *Koo C.H. et al.* Development of simulation infrastructure compatible with ESA SMP for validation of flight software and verification of mission operation // *SESP (ESA): Simulation and EGSE for Space Programmes*. 2012.
20. *Lammen W.F., Jaffry D., Moelands J.M., Wijnands Q.* Connecting MATLAB to the SMP2 Standard. Harmonizing new and traditional approaches for automatic model transfer // *Report*. Netherlands Aerospace Centre. ESTEC Noordwij. 2016. 21 p.
21. *Strzepek A. et al.* A training, operations and maintenance simulator made to serve the MERLIN mission // *14th International Conference on Space Operations*. 2016. pp. 2410.
22. *Стратилатов Н.Р., Куренков В.И., Кучеров А.С., Якищук А.А.* Методические основы разработки проблемно-ориентированной системы выбора основных проектных параметров космических аппаратов // *Вестник Самарского университета. Аэро-космическая техника, технологии и машиностроение*. 2016. Т. 15. № 2. С. 68–79.
23. *Хомоненко А.Д., Старобинец Д.Ю., Лохвицкий В.А.* Модель оценки оперативности функционирования бортового комплекса управления космическими аппаратами дистанционного зондирования Земли // *Труды СПИИРАН*. 2016. Вып. 3(46). С. 49–64.
24. *Срульдинов А.Р., Варламова С.А.* Построение модели предоставления технической поддержки пользователей на языке моделирования AnyLogic // *Журнал «Juvenis scientia»*. Вып. 3. 2016. С. 11–14.
25. *Андреев А.М., Хацаюк В.О.* Алгоритм оценивания пространственной доступности радионизлучений космических аппаратов командно-ретрансляционных систем с использованием имитационного моделирования // *Труды военно-космической академии им. А.Ф. Можайского*. 2016. № 650. С. 57-61.
26. *Марченко А.С., Сулин А.Б.* Логическое моделирование элемента системы жизнеобеспечения в режиме реального времени // *Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки*. 2016. № 2(41). С. 93–103.
27. *Жихарев А.Г. и др.* Об имитационном моделировании производственно-технологических систем // *Научный результат. Сер. Информационные технологии*. 2016. Т. 1. № 3(3). С. 24–31.

28. *Миков А.И., Замятина Е.Б.* Опыт использования методов искусственного интеллекта при разработке систем имитации // Материалы конференции «Искусственный интеллект в решении актуальных социальных и экономических проблем XXI века». 2016. С. 19–23.
29. Simulation modelling platform – Volume 2a: Metamodel. ECSS E-40-07 // ESA Requirements and Standards Division ESTEC. The Netherlands. 2011. 169 p.

Ноженкова Людмила Федоровна — д-р техн. наук, профессор, заведующая отделом прикладной информатики, Институт вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН. Область научных интересов: информационные технологии, интеллектуальные системы, интегрированные системы, оперативная аналитическая обработка данных, геоинформационные экспертные системы, поддержка принятия решений, чрезвычайные ситуации, мониторинг, поддержка размещения заказов, поддержка конструирования бортовой аппаратуры, моделирование бортовой аппаратуры, проверочные испытания бортовой аппаратуры. Число научных публикаций — 190. expert@icm.krasn.ru; Академгородок, 50, стр. 44, Красноярск, 660036; р.т.: +7(391)2-90-79-54.

Исаева Ольга Сергеевна — к-т техн. наук, старший научный сотрудник отдела прикладной информатики, Институт вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН. Область научных интересов: системный анализ, информационные технологии, методы искусственного интеллекта. Число научных публикаций — 55. isaeva@icm.krasn.ru; Академгородок, 50, стр. 44, Красноярск, 660036; р.т.: +79135194099.

Евсюков Александр Анатольевич — к-т техн. наук, старший научный сотрудник отдела прикладной информатики, Институт вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН. Область научных интересов: экспертные системы, 3D-моделирование, компьютерная графика. Число научных публикаций — 43. alev@icm.krasn.ru; Академгородок, 50, стр. 44, Красноярск, 660036; р.т.: +7(391)2-90-79-54.

Поддержка исследований. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-41-242042) и Правительства Красноярского края.

L.F. NOZHENKOVA, O.S. ISAEVA, A.A. EVSYUKOV
**TOOLS OF COMPUTER MODELING OF THE SPACE SYSTEMS’
 ONBOARD EQUIPMENT FUNCTIONING**

Nozhenkova L.F., Isaeva O.S., Evsyukov A.A. Tools of Computer Modeling of the Space Systems’ Onboard Equipment Functioning.

Abstract. The article describes a tool software complex allowing to build, execute and integrate simulation models of the space systems’ onboard equipment functioning. It is based on a reuse technology defined by the international Simulation Model Portability (SMP2) standard. Along with the standard rules for building integrable models, we have designed additional original tools of information-graphical and intellectual modeling. In this way, we provide graphical construction of onboard systems’ architecture models, set the methods of model function and determine the options of command execution by onboard equipment.

This work is part of creation of software for the problem-oriented simulation modeling infrastructure in space industry. This software complex will allow designers not only to build their own onboard systems’ models, but also to unite simulators of the equipment produced by different companies and to make simulation tests for preparation and analysis of technical projects. Our approach provides economic and technological advantages for space industry’s knowledge-intensive production development.

Keywords: simulation infrastructure, simulation model portability standard, spacecraft, onboard equipment, command and measuring system.

Nozhenkova Ludmila Fedorovna — Ph.D., Dr. Sci., professor, head of applied informatics department, Institute of computational modelling of the Siberian branch of the Russian academy of sciences. Research interests: information technologies, intelligent systems, integrated systems, OLAP, geoinformation expert systems, decision support system, support for placing orders, support for the design of onboard equipment, modeling and testing of onboard equip-men. The number of publications — 190. expert@icm.krasn.ru; 50, Akademgorodok, building 44, Krasnoyarsk, 660036, Russia; office phone: +7(391)2-90-79-54.

Isaeva Olga Sergeevna — Ph.D., senior researcher of applied computer science department, Institute of computational modelling of the Siberian branch of the Russian academy of sciences. Research interests: system analysis, information systems, databases, artificial intelligence. The number of publications — 55. isaeva@icm.krasn.ru; 50, Akademgorodok, building 44, Krasnoyarsk, 660036, Russia; office phone: +79135194099.

Evsyukov Alexander Anatolievich — Ph.D., senior researcher of applied informatics department, Institute of computational modelling of the Siberian branch of the Russian academy of sciences. Research interests: expert systems, 3D-modeling, computer graphics. The number of publications — 43. alev@icm.krasn.ru; 50, Akademgorodok, building 44, Krasnoyarsk, 660036, Russia; office phone: +7(391)2-90-79-54.

Acknowledgements. This research is supported by RFBR (grant 16-41-242042) and Government of Krasnoyarsk Territory.

References

1. Liu Y., Zhang L., Zhang W., Hu X. An overview of simulation-oriented model reuse. Theory, methodology, tools and applications for modeling and simulation of complex systems. 2016. vol. 646. pp. 48–56.

2. Nozhenkova L., Isaeva O., Gruzenko E. Computer Simulation of Spacecraft Onboard Equipment. ACSR-Advances in Computer Science Research. 2015. vol. 18. pp. 943–945.
3. AnyLogic 7.2 Released – AnyLogic Simulation Software. Available at: www.anylogic.com. (accessed: 02.06.2016).
4. Schmidt A., Durak U., Pawletta T. Model-based testing methodology using system entity structures for Matlab/Simulink models. *SIMULATION: Transactions of the society for modeling and simulation international*. 2016. vol. 92-8. pp. 729–746.
5. Bress T. Effective LabView Programming. NTS Press. 2013. 720 p.
6. Simulation modelling platform. ECSS E-40-07. ESA Requirements and Standards Division ESTEC. The Netherlands. 2011. 49 p.
7. Fritzen P., Segneri D., Pignede M. SWARMSIM – The first fully SMP2 based Simulator for ESOC. Proceedings of the 11th International Workshop on Simulation & EGSE facilities for Space Programmes. ESTEC. 2010. 8 p.
8. Eickhoff J. Simulating Spacecraft System. Springer. 2009. 353 p.
9. Nozhenkova L., Isaeva O., Gruzenko E., Markov A. Problem-oriented integration of SMP-models in the simulation modeling infrastructure. *Advances in Intelligent Systems Research*. 2017. vol. 141. pp. 121–124.
10. Nozhenkova L.F., Isaeva O.S., Vogorovskiy R.V. Command and Software Control Simulation for Testing Spacecraft Onboard Equipment. International Conference on Advanced Manufacture Technology and Industrial Application. 2016. pp. 349–353.
11. Schamai W., Fritzon P., Paredis C. Translation of UML State Machines to Modelica: Handling Semantic Issues. *Simulation*. 2013. pp. 498–512.
12. Nozhenkova L.F. et al. Unified description of the onboard equipment model on the basis of the «Simulation Model Portability» standard. *Advances in Intelligent Systems Research*. 2016. vol. 133. pp. 481–484.
13. Nozhenkova L.F. et al. [Complex support of designing onboard control and management systems of spacecrafts on the basis of intellectual simulation model]. *Informacionnye tehnologii – Information Technology*. 2015. vol. 9. pp. 706–714. (In Russ.).
14. Lopatkin R.Ju., Petrov S.A., Ignatenko S.N., Ivashhenko V.A. [Prospects for applying simulation modeling in automation tasks and control of technological systems]. *Visnik NTU «HPI». Serija: Mehaniko-tehnologichni sistemi ta kompleksi. – Bulletin of the NTU "KhPI". Series: Mechanic-technological systems and complexes*. Harkiv: NTU «HPI». 2015. vol. 17(1189). pp. 61–71. (In Russ.).
15. Arguello L., Miró J., Gujer J., Nergaard K. SMP: A Step Towards Model Reuse in Simulation. *ESA Bulletin*. 2000. pp. 108–112.
16. Eito-Brun R. Design of an Ontologies for the Exchange of Software Engineering data in the Aerospace Industry. Communications in Computer and Information Science. 2016. vol. 649. pp. 71–78.
17. Sarkarati M., Merri M., Spada M. Cloud based architectures in ground systems of space missions. GSW 2013. ESA. 2013. 14 p.
18. Cazenave C., Arrouy W. Implementing SMP2 standard within SimTG simulation infrastructure. SESP 2012: Simulation and EGSE for space programmes. ESTEC. Noordwijk. 2012. 13 p.
19. Koo C.H. et al. Development of simulation infrastructure compatible with ESA SMP for validation of flight software and verification of mission operation. SESP (ESA): Simulation and EGSE for Space Programmes. 2012.
20. Lammen W.F., Jaffry D., Moelands J.M., Wijnands Q. Connecting MATLAB to the SMP2 Standard. Harmonizing new and traditional approaches for automatic model transfer. Report. Netherlands Aerospace Centre. ESTEC Noordwijk. 2016. 21 p.
21. Strzepek A. et al. A training, operations and maintenance simulator made to serve the MERLIN mission. 14th International Conference on Space Operations. 2016. pp. 2410.

22. Stratilatov N.R., Kurenkov V.I., Kuchеров A.S., Jakishhik A.A. [Methodical bases for the development of a problem-oriented system for selecting the basic design parameters of spacecraft]. *Vestnik Samarskogo universiteta. Ajerokosmicheskaja tehnika, tehnologii i mashinostroenie – Bulletin of the Samara University. Aerospace technology, technology and engineering*. 2016. vol. 15. no. 2. pp. 68–79. (In Russ.).
23. Homonenko A.D., Starobinec D.Ju., Lohvickij V.A. [A model for assessing the operational efficiency of the on-board control complex of space-borne remote sensing of the Earth]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*. 2016. vol. 3(46). pp. 49–64. (In Russ.).
24. Srul'dinov A.R., Varlamova S.A. [Building a model for providing technical support to users in AnyLogic modeling language]. *Zhurnal «Juvenis scientia» – Journal «Juvenis scientia»*. vol. 3. 2016. pp. 11–14. (In Russ.).
25. Andreev A.M. Hacajuk V.O. [Algorithm for estimating the spatial availability of radio emissions of spacecraft command-retransmission systems using simulation simulations]. *Trudy voenno-kosmicheskoy akademii im. A.F. Mozhajskogo – Proceedings of the Mozhaisky Military Space Academy*. 2016. vol. 650. pp. 57–61. (In Russ.).
26. Marchenko A.S., Sulin A.B. [Logical modeling of the life support system element in real time]. *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. Tehničeskie nauki – Bulletin of the Dagestan State Technical University. Technical science*. 2016. vol. 2 (41). pp. 93–103. (In Russ.).
27. Zhiharev A.G., Korchagina K.V., Buzov P.A., Akulov Ju.V., Zhihareva M.S. [On the simulation of production and technological systems]. *Nauchnyj rezul'tat. Ser. Informacionnye tehnologii – Scientific Result. Ser. Information Technology*. 2016. Issue 1. vol. 3(3). pp. 24–31. (In Russ.).
28. Mikov A.I., Zamjatina E.B. [Experience in the use of artificial intelligence methods in the development of simulation systems]. *Materialy konferencii «Iskusstvennyj intellekt v reshenii aktual'nyh social'nyh i jekonomicheskijh problem XXI veka»* [Proceedings of the conference «Artificial Intelligence in Solving the Urgent Social and Economic Problems of the 21st Century»]. 2016. pp. 19–23. (In Russ.).
29. Simulation modelling platform – Volume 2a: Metamodel. ECSS E-40-07. ESA Requirements and Standards Division ESTEC. The Netherlands. 2011. 169 p.

А.И. Лоскутов, Г.И. Козырев, В.А. Клыков, О.Л. Шестопалова
**СИНТЕЗ АДАПТИВНЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ
БОРТОВЫХ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ
КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ
ГОМОЛОГИЧНЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ СТРУКТУР**

Лоскутов А.И., Козырев Г.И., Клыков В.А., Шестопалова О.Л. Синтез адаптивных математических моделей бортовых радиоэлектронных систем космических аппаратов на основе применения гомологичных математических структур.

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы синтеза адаптивных математических моделей применительно к задачам технического диагностирования бортовых радиоэлектронных систем (БРЭС) космических аппаратов (КА). Сформулирована задача синтеза адаптивной модели БРЭС КА в общем виде с использованием преобразования исходной математической структуры в гомологичную структуру меньшей размерности. Представлен подход к синтезу адаптивных моделей на основе использования математического аппарата конечных автоматов. Новизна подхода заключается в том, что гомологичная структура меньшей размерности синтезирована за счет преобразования отношений между элементами множества телеметрируемых (контролируемых) параметров (выходных переменных конечно-автоматной модели). Приведен пример синтеза адаптивной к процессу контроля технического состояния математической модели центрального блока бортовой радиотелеметрической системы. Выполнено оценивание эффективности синтезированной адаптивной модели БРЭС КА по показателю оперативности путем решения задачи «китайского почтальона».

Ключевые слова: техническое диагностирование, контроль, бортовая аппаратура, космический аппарат, математическая модель, конечный автомат.

1. Введение. Современный этап развития изделий ракетно-космической техники (РКТ) характеризуется повышением требований к эффективности их функционирования. В свете указанных требований увеличение сроков активного существования и автономности космических аппаратов является одним из основных частных показателей эффективности функционирования КА, связанных не только с развитием элементной базы, но и с совершенствованием специального математического обеспечения (СМО) функционирования бортовой аппаратуры КА [1]. В свою очередь, создание перспективных КА с высокими целевыми и эксплуатационными характеристиками требует разработки новых подходов к решению проблемы обеспечения работоспособности бортовых систем как специальных, так и служебных. Важнейшим направлением решения данной проблемы является разработка и создание систем контроля и диагностирования, которые позволяют при достаточно низком уровне ресурсных затрат с требуемой достоверностью и полнотой оценивать техническое состояние бортовых систем (БС), а также формировать воздействия по управлению в процессе его целевого применения. Разработка таких

систем невозможна без математического моделирования функционирования современной высокотехнологичной бортовой аппаратуры (БА) и решения оптимизационных задач над множеством данных моделей [2]. В [3] приведены основные требования к построению данного рода моделей. В условиях автономного функционирования, когда система обладает обширным спектром ресурсных ограничений (временных, энергетических) наиболее актуальным представляется требование по адаптивности синтезируемой модели процессов функционирования БА КА под конкретную задачу. Данный факт подтверждается перспективным направлением в области создания систем автономного контроля [4], разрабатываемых с учетом моделей бортовой аппаратуры, построенных на основе различных математических инструментов [5-9].

2. Постановка задачи синтеза адаптивных математических моделей бортовых систем космических аппаратов. Из работы [10] известно, что адаптивность есть свойство модели, позволяющее менять параметры, задавать точность, перестраивать структуру модели, изменять взаимодействие ее элементов с учетом изменяющихся условий под определенные задачи, в частности под задачу контроля и (или) технического диагностирования. В теории моделирования модель рассматривается как некоторая конкретная математическая структура, которая в общем виде может быть представлена в виде набора базисных множеств вместе с одним или несколькими отношениями, заданными на множестве из этого набора [11]:

$$\Sigma = \langle \Omega; R \rangle, \quad (1)$$

где $\Omega = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ — набор базисных множеств; $R = \{r_1, r_2, \dots, r_g\}$ — набор отношений над базисными множествами Ω .

В свою очередь, синтез адаптивной модели подразумевает возможность преобразования выражения (1) в гомологичную математическую структуру Σ' , синтезированной под задачу контроля технического состояния конкретной бортовой РЭС:

$$\eta: \Sigma \rightarrow \Sigma', \quad (2)$$

где $\Sigma' = \langle \Omega', R' \rangle$ — гомологичная математическая структура, которая характеризуется одинаковыми по отношению к структуре (1) схемами

образования отношений $R' = \{r'_1, r'_2, \dots, r'_g\}$, заданными на системе базисных множеств $\Omega' = \{X'_1, X'_2, \dots, X'_n\}$.

С математической точки зрения, преобразование (2) может быть определено с помощью гомоморфного отображения (гомоморфизма):

$$\eta \in \text{Hom}(\Sigma, \Sigma'). \quad (3)$$

В общем виде гомоморфизмом или гомоморфным отображением математической структуры (1), заданной на базисных множествах Ω , в математическую структуру Σ' , заданную на базисных множествах Ω' , называется такой канонический кортеж отображений $\langle \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n \rangle$, который удовлетворяет следующему условию для соответствующих отношений R и R' этих структур [3]:

$$\forall (\langle x_1, x_2, \dots, x_n \rangle) \langle x_1, x_2, \dots, x_n \rangle \in R \Rightarrow \langle \lambda_1(x_1), \lambda_2(x_2), \dots, \lambda_n(x_n) \rangle \in R', \quad (4)$$

где запись $\langle x_1, x_2, \dots, x_n \rangle \in R$ означает, что элементы $\langle x_1, x_2, \dots, x_n \rangle$ связаны между собой отношением R , а запись $\langle \lambda_1(x_1), \lambda_2(x_2), \dots, \lambda_n(x_n) \rangle \in R'$ означает, что элементы $\langle \lambda_1(x_1), \lambda_2(x_2), \dots, \lambda_n(x_n) \rangle$ связаны между собой отношением R' .

Необходимо отметить, что если отображения $\lambda_i, i=\overline{1, n}$, в выражении (4) является биективными, то образованная математическая конструкция Σ' будет изоморфизмом по отношению к (1). При этом будут отсутствовать потери информации. Однако наибольший практический интерес представляет случай, когда отображения $\lambda_i (i=\overline{1, n})$ есть сюръективные отображения, и следовательно, эти отображения можно назвать агрегирующими функциями [3]. В результате преобразования данных функций модель Σ' будет уже эпиморфизмом по отношению к Σ . Каждая такая функция индуцирует соответствующее фактор-множество агрегирования X'_i / λ_i и, если удастся построить соответствующую фактор-модель, то можно сказать, что она отражает взаимосвязи между элементами исходной структуры с точностью или разрешающей способностью, необходимой для решения целевых задач, то есть до элементов или до классов эквивалентности. При этом отношения между элементами x_i заменяются отношениями между классами эквивалентности x'_i .

Согласно ГОСТу [12], задачами технического диагностирования БА КА являются контроль технического состояния (ТС), поиск места и определение причин отказа (неисправности) и прогнозирование ТС. Решение каждой из трех задач технического диагностирования характеризуется своими показателями P и целевой функцией F , в рамках которой будет решаться оптимизационная задача по выбранному показателю оптимальности:

$$F(P) \rightarrow opt. \quad (5)$$

Таким образом, математическая постановка задачи синтеза адаптивной к процессу технического диагностирования математической модели заключается в нахождении отображения (2), позволяющего синтезировать гомологичную математическую структуру (3) при условии (4) в рамках оптимального решения задачи (5):

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda : \Sigma \rightarrow \Sigma', \\ \lambda \in Hom(\Sigma, \Sigma'), \\ \forall (\langle x_1, x_2, \dots, x_n \rangle) \langle x_1, x_2, \dots, x_n \rangle \in R \Rightarrow \langle \lambda_1(x_1), \lambda_2(x_2), \dots, \lambda_n(x_n) \rangle \in R', \\ F(P) \rightarrow opt. \end{array} \right. \quad (6)$$

Определение отображения (2) зависит от математического аппарата (инструментария) с помощью которого осуществляется формализация процессов функционирования. В свою очередь, сама процедура формализации процессов функционирования будет зависеть от свойств моделируемого объекта.

3. Синтез адаптивных математических моделей бортовых радиоэлектронных систем космических аппаратов для решения задачи технического диагностирования.

3.1. Обоснование выбора математического аппарата конечных автоматов для формализации процесса функционирования бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата. В состав современных КА входит значительное число разнообразной по своему назначению бортовой аппаратуры, каждая из которых является достаточно сложной технической системой. Отдельные бортовые системы КА реализуют различные алгоритмы функционирования и имеют, соответственно, различную структуру и различную организацию функционально-информационного обмена между элементами. Таким образом, большинство бортовых систем объекта является неоднородным по своей структуре и функциональным свойствам. Поэтому для описания

разных компонентов бортовых систем требуются различные математические инструменты. При этом возникает проблема сопряжения разнородных математических моделей между собой. В итоге модель всей рассматриваемой системы получается весьма сложной и громоздкой, вследствие чего они зачастую оказываются малопригодными для решения задач диагностики, так как в них не описывается механизм появления отказов и их влияние на работоспособность контролируемых систем.

Отмеченные обстоятельства создают определенные трудности для практического использования моделей, построенных на основе определенных математических инструментов, при решении задачи технического диагностирования. Для преодоления этих трудностей необходимо применение модели с более высоким уровнем абстракции, которая позволяла бы рассматривать все технические системы объекта (или хотя бы большинство из них) с позиций единого методологического подхода. Кроме того, исходя из общей постановки задачи определения технического состояния отдельных систем и всего объекта в целом, необходимо иметь такую модель, в которой учитывалась бы возможность появления случайных отказов в моделируемом объекте. И, наконец, модель должна быть удобной для ее реализации на вычислительных средствах, в смысле приемлемого объема потребной памяти и быстродействия.

Следует, однако, отметить, что повышение уровня абстракции модели неизменно влечет за собой определенную идеализацию, при которой исключаются из рассмотрения некоторые несущественные стороны контролируемого объекта, а основное внимание сосредотачивается на главных его свойствах. Лишенная некоторых деталей, такая модель неполно характеризует исследуемый объект, но, во-первых, именно поэтому его легче изучать и, во-вторых, требуется использовать для этих целей значительно меньше информации. Это дает существенный выигрыш во времени, которое затрачивается на получение результата контроля технического состояния БА КА. Данный фактор при техническом диагностировании зачастую играет определяющую роль, поэтому использование таких моделей становится наиболее целесообразным.

Обширный опыт создания моделей поведения различных объектов, изучаемых в различных теориях, был обобщен в рамках общей теории систем, которая имеет междисциплинарный характер. Результатом этого обобщения явилась некоторая модель, получившая название динамической системы [11, 13].

На практике наиболее изучены свойства некоторых специальных видов динамических систем. С одной стороны, они проще в изучении, а

с другой — они достаточно хорошо описывают многие реальные объекты. К таким видам относят вероятностные динамические системы, стационарные динамические системы, а также дискретные и непрерывные динамические системы. В общем виде динамические системы и различные их подклассы допускают широкий спектр возможных представлений, использующих различный математический аппарат. Каждый из возможных формализмов характеризуется своей техникой и отражает определенную точку зрения на предметную область, применительно к которой он используется.

В общем случае математический аппарат, используемый для формализации процессов функционирования БА, может быть различным. Синтез математических моделей при решении задачи технического диагностирования бортовой радиоэлектронной аппаратуры КА удобно осуществлять с помощью математического аппарата стационарных дискретных динамических систем. В литературе [14-17] подробно рассмотрены вопросы математического моделирования и решения задачи технического диагностирования с применением агрегированных моделей. С математической точки зрения данный вид моделей можно представить следующей математической конструкцией [3]:

$$\Sigma_g = \langle E, \Pi, T^*, R, \Psi, P, C, A, B \rangle, \quad (7)$$

где E — множество технических состояний; Π — совокупность проверок, необходимых для определения видов технического состояния E ; T^* — множество моментов времени выполнения проверок Π ; R — множество признаков всех технических состояний E ; Ψ — оператор, устанавливающий связь между множеством состояний E , множеством проверок Π и множеством моментов времени T их выполнения с одной стороны, и множеством ожидаемых исходов проверок R с другой; P — вероятностная мера, заданная на множестве E ; C — множество цен проверок Π ; A, B — множество ошибок первого и второго рода для выполненных проверок.

Множества E, Π, T^*, R в модели (7) являются базовыми и используются для непосредственной организации процесса диагностирования. Множества P, C, A, B задают ограничения, которые используются для оптимизации процедуры диагностирования. Особенностью данной модели является то, что в ней описывается изменения состояния объекта, как функции времени, но не раскрываются причинно-следственные связи, вызывающие это изменение вследствие отсутствия в модели множества входных воздействий, вызывающих

переход объекта из одного технического состояния (определенного в рамках синтезированной модели) в другое [3].

Необходимо отметить, что данная модель является наиболее полной с точки зрения контроля технического состояния стационарных дискретных динамических систем. Однако на практике, вследствие сложности получения априорных данных, необходимых для построения математической модели (определение множеств P , C , A , B), невозможности раскрытия причинно-следственных связей, а также из-за большой размерности получаемых моделей, возникает необходимость применения менее сложных математических аппаратов, таких как сети Петри [18, 19] или конечно-автоматные модели [20, 21]. Далее в работе будет рассмотрен подход для формализации процессов функционирования БРЭА КА на основе применения математического аппарата конечных автоматов.

Данный математический аппарат обладает рядом достоинств, а именно: развитость теории, относительная простота и адекватность описания дискретных объектов (во времени и по состояниям), использование для их изучения финитных методов логики и алгебры.

Существует множество объектов контроля и управления, связанных с большой ответственностью: ядерные и химические реакторы, комплексы оборонного и космического назначения и тому подобное. Успех в работе с ними прямо зависит от четкости и слаженности действий, от умения принимать выверенные решения и грамотно анализировать ситуацию, от возможности однозначной интерпретации информации. Различная природа физических процессов, протекающих в объектах, сложный характер взаимодействия между ними обуславливает трудности разработки, алгоритмизации и программирования задач контроля и управления. Возникают также трудности, связанные с необходимостью достижения наглядности и структурированности. Для решения этих задач используется развитый математический аппарат теории автоматов [22-25]. Описание логики поведения при автоматном подходе структурировано. Это свойство делает автоматное описание сложного поведения наглядным и ясным. Корректность работы при использовании автоматов закладывается еще на этапе проектирования благодаря графическому представлению процессов функционирования сложных объектов. Однако при применении конечно-автоматных моделей часто возникают трудности при синтезе алгоритмов контроля на основе данных моделей в виду большой размерности получаемых математических конструкций, так называемое «проклятие размерности».

Обычно конечный автомат описывается в виде упорядоченной пятерки [22-25]:

$$A = \langle X, Y, Q, f, \varphi \rangle, \quad (8)$$

где X — множество входных воздействий (алфавит входных символов); Y — множество выходных переменных или телеметрируемых параметров (алфавит выходных символов); Q — множество состояний; $f: Q \times X \rightarrow Q$ — функция переходов; $\varphi: Q \rightarrow Y$ — функция выходов для автомата Мура (автомата 2-го рода).

Значениями функции переходов модели являются состояния $q(t+1) = f(q(t), x(t))$, в которых оказывается автомат в момент времени $t+1$, если в предыдущий момент времени t он находился в состоянии $q(t)$ и подвергался воздействию $x(t)$.

Значениями функции выходов являются выходы $y(t) = \varphi(q(t))$, определяемые только текущим состоянием.

Вместо времени обычно пользуются тактами или словосочетаниями: предыдущее состояние, последующее состояние:

$$q_{i+1} = f(q_i, x_i); \quad q_i \xrightarrow{x_i} q_{i+1}, \quad \varphi(q_i) = y_i.$$

Построение адаптивных моделей бортовой аппаратуры автономных КА на основе математического аппарата конечных автоматов с целью технического диагностирования может быть осуществлено исходя из подзадач технического диагностирования, а именно: синтеза модели с целью контроля технического состояния (ТС) и синтеза модели с целью диагностирования. При этом речь идет о структурной адаптации, связанной с минимизацией пространства состояний при решении конкретной задачи, так как изменение мощности множества (количества) состояний исходной конечно-автоматной модели приводит к изменению ее структуры.

Под контролем ТС понимается определение вида ТС объекта. Под диагностированием в данном случае будем понимать поиск места и определение причин отказа (неисправности) [12]. В зависимости от этапа эксплуатации и решаемых целевых задач в качестве цели контроля могут рассматриваться проверка исправности, проверка работоспособности или проверка правильности функционирования. Минимальным по объему является контроль правильности функционирования БА КА в заданный момент времени (с учетом предыстории) при его применении по назначению. На этом этапе более полный контроль (проверка исправности или работоспособности), как правило, не осуществляется. В связи с этим возникает необходимость преобразования моделей объектов контроля вида (8),

удовлетворяющих требованиям достоверности и оперативности, в особенности, на этапе автономного функционирования БА КА.

Каждое состояние q_i конечно-автоматной модели (КАМ) характеризуется своим образом $(y_1^i, y_2^i, \dots, y_m^i)^m$ в m -мерном пространстве, $i = \overline{1, n}$. Из литературы [26] известно, что одним из направлений оптимизации решения задачи контроля является сокращение размерности пространства состояний путем нахождения обобщенных диагностических признаков. Данный поиск может быть реализован при помощи агрегирующей функции $\lambda_i (i = \overline{1, n})$ над множеством выходных переменных, удовлетворяющей условию (4):

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda : Y \rightarrow Y' \Rightarrow Q' : |Q| \rightarrow \min, |Y'| < |Y|, \\ \langle y_1, y_2, \dots, y_n \rangle \in Q \Rightarrow \langle \lambda_1(y_1), \lambda_2(y_2), \dots, \lambda_k(y_k) \rangle \in Q_{\min}, k < n. \end{array} \right. \quad (9)$$

В результате этого математическая конструкция (11) примет вид:

$$A_{\min} = \langle X, Q' | Q_{\min}, f, \varphi \rangle. \quad (10)$$

Математическая конструкция вида (10) называется минимальной формой конечно-автоматной модели. В теоретическом плане A_{\min} является изоморфизмом по отношению к исходной полной конечно-автоматной модели A (8), так как преобразование (9) происходит без потерь в информационном плане:

$$A_{\min} \cong A. \quad (11)$$

Однако на практике реализовать соответствие (11) при построении модели (10) весьма затруднительно ввиду наличия потерь в процессе преобразования (9). Обычно преобразование модели (8) в модель (10) является эпиморфизмом:

$$\lambda : A \rightarrow A_{\min} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \lambda \in \text{Hom}(A, A_{\min}) \\ m \circ f = h \circ f \Rightarrow m = h, \end{array} \right. \quad (12)$$

где $m \circ f = h \circ f \Rightarrow m = h$ – условие эпиморфизма.

Синтез модели (10) может быть реализован поиском семантически обобщенного параметра на множестве выходных переменных (телеметрируемых параметров) Y и построением минимальной формы конечного автомата (минимизации конечного

автомата) за счет вновь образованных классов эквивалентности по обобщенному параметру. Каждому параметру из Y' необходимо сопоставить класс всех тех телеметрических сообщений $S_k \in Y$, которые могут быть отображены в данный параметр за счет некоторого отображения. Построение такого класса является обобщением входящих в него телеметрических сообщений по индивидуальным (семантическим) признакам, присущим только данному классу. Процесс определения обобщенного параметра можно представить в виде коммутативной диаграммы [26] (рисунок 1):

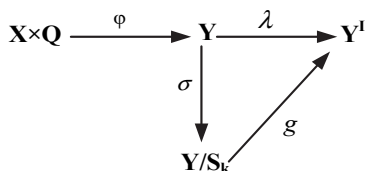


Рис. 1. Коммутативная диаграмма нахождения обобщенных диагностических признаков

Функция выходов представляет собой последовательность отображений φ и λ , которые позволяют преобразовывать множества текущих состояний в множество обобщенных параметров Y' . Последнее отображение, в свою очередь, также является композицией двух отображений. В общем случае определение обобщенного параметра можно разделить на несколько этапов:

1. На первом этапе в результате отображения φ происходит определение исходного множества телеметрируемых параметров Y из текущих состояний Q :

$$\varphi: Q \rightarrow Y. \quad (13)$$

2. На втором этапе в результате семантического анализа вектора телеметрических данных $q_j = \{y_i\}$, где $i = \overline{1, m}, j = \overline{1, r}$ происходит определение классов телеметрических сообщений $S_k = \{q_f\}$, $f = \overline{1, r}, k = \overline{1, s}$, по семантически общему признаку, присущему данному классу сообщений, то есть, осуществляется факторизация исходного множества Y . Данная операция представляется в виде отображения:

$$\sigma : Y \rightarrow Y / S_k. \quad (14)$$

По своему смыслу данное отображение является наложением (сюръекцией) и называется естественным отображением [27, 28].

3. На третьем этапе осуществляется определение обобщенных диагностических признаков $y'_i \in Y'$, которые будут индивидуальны для каждого класса S_k . Данная операция представляется в виде взаимно-однозначного отображения:

$$g : Y / S_k \rightarrow Y'. \quad (15)$$

В общем случае поиск обобщенного диагностического признака представляет собой композицию отображений g и k :

$$\lambda = \sigma \circ g. \quad (16)$$

Из литературы [22] известно, что минимизация числа состояний исходного автомата связана с анализом эквивалентности этих состояний. Определение обобщенного диагностического признака по отображению λ приведет к образованию классов эквивалентности и, соответственно, минимизации числа состояний.

Представленный способ преобразования исходной модели объекта показывает возможность синтеза адаптивной к процессам контроля или технического диагностирования математической модели с целью построения оптимальных алгоритмов контроля на основе обобщенных диагностических признаков.

Основным содержанием задачи построения алгоритма контроля технического состояния БА КА является синтез программ контрольных испытаний (ПКИ), задающих последовательность управляющих воздействий при проведении электрических проверок, которая осуществляет обход переходов в рамках синтезированной математической модели.

Известно из [22], что при описании исправных бортовых систем КА конечно-автоматной моделью наличие дефекта в КА соответствует трансформации его в новый конечный автомат, отличающийся от модели исправного КА. В этом случае построение программы контрольных испытаний может быть сведено к синтезу ПКИ, позволяющей отличить конечный автомат, моделирующий функционирование исправной БА, от любого другого конечного

автомата, ему не эквивалентного. При этом обязательно должен быть зафиксирован класс неисправностей, обнаруживаемых в рамках используемой модели. Таким образом может быть решена задача поиска места и выявления причин отказа, определяемая глубиной диагностирования бортовых систем КА. В свою очередь, для решения задачи контроля время на выполнение всей ПКИ нужно свести к минимуму:

$$t(X^*) = \sum_{i=1}^k \Delta t_i \rightarrow \min, \quad (17)$$

где X^* — программа контрольных испытаний, необходимая для принятия решения о виде технического состояния БС КА; Δt_i — время, необходимое на выполнение управляющего воздействия из X^* .

Данная задача может решаться либо нахождением цикла, удовлетворяющего условию (17), за счет мощных алгоритмических средств, разработанных в теории графов, либо за счет преобразования и уменьшения размерности самой модели не ниже требуемого уровня.

4.2. Пример синтеза адаптивной математической модели бортовой радиотелеметрической системы космического аппарата на основе математического аппарата конечных автоматов. В качестве примера рассмотрим синтез декомпозированной конечно-автоматной модели бортовой радиотелеметрической системы (БРТС) БР-9ЦК-1 [29]. Произведенный синтез математической модели БРТС на основе технической документации (описательной или вербальной модели) [30-32] позволил получить пять логических подсистем (ЛПС), формализующих процесс функционирования пяти блоков исходной системы БР-9ЦК-1. В свою очередь, были получены подавтоматы работы передатчика, запоминающего устройства, системы питания, датчика времени и центрального блока. Рассмотрим логическую подсистему центрального блока, характеризующую режимы функционирования всей БРТС, с целью определения возможности синтеза адаптивной модели под задачу контроля технического состояния. В общем виде образ (телеметрический образ) $(y^i_1, y^i_2, \dots, y^i_m)^T$ каждого состояния q_i центрального блока характеризуется структурой командно-служебного слова (КСС), которая, в свою очередь, определяет режим функционирования БРТС в целом.

В таблице 1 представлены управляющие воздействия (УВ), подаваемые на БРТС в процессе наземных испытаний и режимы ее функционирования [30-32].

Таблица 1. Управляющие воздействия и режимы функционирования БРТС

Номер УВ, x_i	Обозначение команды (УВ)	Время выполн.команды Δt , с	Содержание команды и режим функционирования БРТС
x_1	«Питание вкл»	3	Подача питания на систему
x_2	«Питание выкл»	3	Снятие питания с системы
x_3	«НП256»	10	Включение режима непосредственной передачи (НП) с информативностью 25600 изм/с
x_4	«НП32»	10	Включение режима НП с информативностью 3200 изм/с
x_5	«НП32+ЗАП32»	10	Включение совмещенного режима НП и записи с информативностью 3200 изм/с
x_6	«ЗАП8»	10	Включение режима записи с информативностью 800 изм/с
x_7	«НП8+ЗАП8»	10	Включение совмещенного режима НП и записи с информативностью 800 изм/с
x_8	«В32»	10	Включение режима воспроизведения с информативностью 3200 изм/с
x_9	«В8»	10	Включение режима воспроизведения с информативностью 800 изм/с
x_{10}	«НОВ»	3	Обнуление датчика времени (ДВ) и запуск схемы программно-временного устройства (ПВУ) с нулевой отметки
x_{11}	«СТОП ЗУ»	3	Остановка запоминающего устройства (ЗУ)
x_{12}	«ИСХ.ЗУ»	3	Приведение ЗУ в исходное состояние (подготовка к записи)
x_{13}	«ВЫКЛ. ПРД»	3	Выключение передатчиков (технологическая команда)
x_{14}	«ВЫКЛ. ТМ»	3	Выключение системы, кроме схемы ДВ и ПВУ
x_{15}	«ТК»	3	Работа схемы ПВУ в ускоренном режиме (технологическая команда)

Словесные описания состояний (содержательные состояния) в соответствии с режимами логических подсистем, а также значения контролируемых (выходных) параметров в виде функции выходов представлены в таблице 2 [31].

Таблица 2. Функция выходов для ЛПС₂ в табличной форме

Состояния ЛПС, режим функционирования	Допуск параметра
q^2_0 — дежурный режим	0 0 0 0 0 0 0 0
q^2_1 — режим НПс информативностью 25600 изм/с (НП256)	0 1 0 0 0 0 1 1
q^2_2 — режим НПс информативностью 3200 изм/с (НП32)	0 1 0 0 0 0 0 1
q^2_3 — совмещенный режим записи и НПс информативностью 3200 изм/с (ЗАП32+НП32)	0 1 1 0 0 0 0 1
q^2_4 — режим записи с информативностью 800 изм/с (ЗАП8)	0 0 1 1 0 0 1 0
q^2_5 — режим НПс информативностью 800 изм/с (НП8)	0 1 0 0 0 0 1 0
q^2_6 — совмещенный режим записи и НПс информативностью 800 изм/с (НП8+ЗАП8)	0 1 1 1 0 0 1 0
q^2_7 — режим воспроизведения с информативностью 3200 изм/с после записи с информативностью 800 изм/с (В32 (от ЗАП8))	0 0 1 1 0 1 0 1
q^2_8 — режим воспроизведения с информативностью 3200 изм/с после совмещенного режима ЗАП32+НП32 (В32 (от ЗАП32+НП32))	0 1 1 0 0 1 0 1
q^2_9 — режим воспроизведения с информативностью 3200 изм/с после совмещенного режима НП8+ЗАП8 (В32(от НП8+ЗАП8))	0 1 1 1 0 1 0 1
q^2_{10} — режим воспроизведения с информативностью 800 изм/с после записи с информативностью 800 изм/с (В8 (от ЗАП8))	0 0 1 1 0 1 1 0
q^2_{11} — режим воспроизведения с информативностью 800 изм/с после совмещенного режима ЗАП32+НП32 (В8(от НП32+ЗАП32))	0 1 1 0 0 1 1 0
q^2_{12} — режим воспроизведения с информативностью 800 изм/с после совмещенного режима НП8+ЗАП8 (В8 (от НП8+ЗАП8))	0 1 1 1 0 1 1 0
q^2_{13} — технологический режим НП по низкой частоте (НП-НЧ (после ЗАП32))	0 0 0 0 0 0 1 0
q^2_{14} — технологический режим после воспроизведения с информативностью 800 изм/с (Нулевой режим (после В8))	0 0 0 0 0 1 1 0
q^2_{15} — технологический режим после воспроизведения с информативностью 3200 изм/с (Нулевой режим (после В32))	0 0 0 0 0 1 0 1

Граф переходов для логической подсистемы центрального блока представлен на рисунке 2.

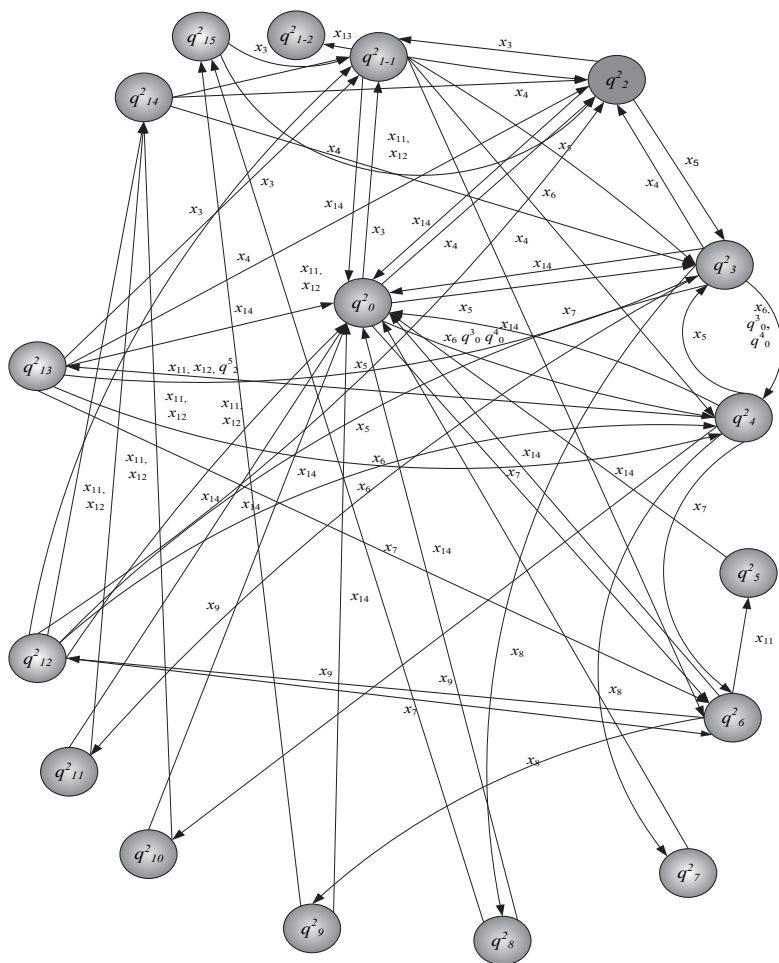


Рис. 2. Граф переходов конечно-автоматной модели логической подсистемы центрального блока

Рассмотрим возможность синтеза минимальной формы конечного автомата на примере режимов функционирования ЛПС₂ БРТС БР-9ЦК-1:

1. По смысловому содержанию и в соответствии с технической документацией все 15 режимов, представленных в таблице 2, можно

разделить на 6 классов, а именно: класс режимов «непосредственная передача информации» — S_1 , класс «непосредственная передача и запись информации» — S_2 , класс «воспроизведения информации» — S_3 , класс «запись информации» — S_4 и класс «технологические режимы» — S_5 . Отдельным классом выделим «дежурный режим» или «режим ожидания команды» — S_0 . Данный режим реализуется после подачи питания на БРТС, при этом начальные установки следующие: питание приборов системы и передатчиков выключено, ЗУ находится в режиме «СТОП». Переход в дежурный режим осуществляется также после подачи команды «x14», при этом происходит сброс текущих установок и выключение питания приборов.

2. В общем виде бинарную последовательность командно-служебного слова можно представить в полиномиальном виде:

$$p_{si}(y) = h_j y^j \oplus \dots \oplus h_2 y^2 \oplus h_1 y^1 \oplus h_0, \quad (18)$$

где $h_j \in \{0,1\}$ — значение j -го разряда КСС, $j = \overline{1, n}$

Из анализа структуры КСС (таблица 3) можно сделать вывод, что для каждой группы режимов существуют разряды, значения которых являются одинаковыми для всего рассматриваемого класса.

Таблица 3. Структура КСС БРТС БР-9ЦК-1

№	Режим	КСС							
		y^7	y^6	y^5	y^4	y^3	y^2	y^1	y^0
1	НП 256	0	1	0	0	0	0	1	1
2	НП32	0	1	0	0	0	0	0	1
3	НП8	0	1	0	0	0	0	1	0
4	НП32+ЗАП 32	0	1	1	0	0	0	0	1
5	НП8+ЗАП8	0	1	1	1	0	0	1	0
6	В32 (от ЗАП8)	0	0	1	1	0	1	0	1
7	В32(от НП32+ЗАП32)	0	1	1	0	0	1	0	1
8	В32(от НП8+ЗАП8)	0	1	1	1	0	1	0	1
9	В8 (от ЗАП8)	0	0	1	1	0	1	1	0
10	В8(от НП32+ЗАП32)	0	1	1	0	0	1	1	0
11	В8 (от НП8+ЗАП8)	0	1	1	1	0	1	1	0
12	ЗАП8	0	0	1	1	0	0	1	0
13	НП-НЧ	0	0	0	0	0	1	0	0
14	Нулевой режим (В8)	0	0	0	0	0	1	1	0
15	Нулевой режим (В32)	0	0	0	0	0	1	0	1

Так, например, для режимов «непосредственная передача информации» общим будет 7-й разряд КСС, значение которого должно быть «1». Таким образом, выражение (18) с учетом отображения (16) будет равно [26]:

$$P_{s1} = y^6,$$

При наличии «1» в 7 и 6 разрядах можно сделать вывод о работе БРТС в одном из режимов класса «непосредственная передача и запись информации»:

$$p_{s2} = y^6 \oplus y^5.$$

Для режима «воспроизведения информации» наличие «1» в 6 и 3 разрядах соответственно будет сигнализировать о соответствующем классе.

3. Относительно данных отличительных разрядов можно говорить об эквивалентности рассматриваемых классов, что, в свою очередь, дает возможность синтезировать минимальную форму конечного автомата в соответствии с выражением (9) [26]. В таблице 4 представлены общие разряды для эквивалентных режимов.

Таблица 4. Эквивалентные классы логической подсистемы центрального блока

№	Режим	КСС							
		y^7	y^6	y^5	y^4	y^3	y^2	y^1	y^0
1.	s_0 (ДЕЖ. РЕЖИМ)	0	0	0	0	0	0	0	0
2.	s_1 (НП)	0	1	0	0	0	0	0	0
3.	s_2 (НП+ЗАП)	0	1	1	0	0	0	0	0
4.	s_3 (ВОСПР)	0	0	1	0	0	1	0	0
5.	s_4 (ЗАП)	0	0	1	0	0	0	0	0
6.	s_5 (ТЕХ. РЕЖИМ)	0	0	0	0	0	1	0	0

На рисунке 3 представлена минимальная форма конечного автомата логической подсистемы центрального блока БР-9ЦК-1 в соответствии с выделенными классами эквивалентности. Петлевые дуги в данной модели не обозначены.

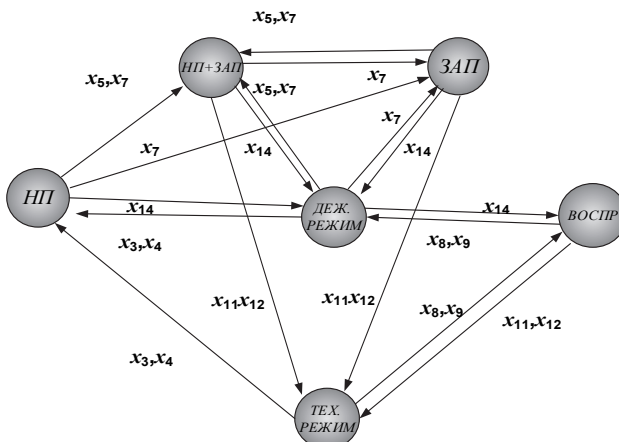


Рис. 3. Минимальная форма конечно-автоматной модели ЛПС центрального блока БИТС БР-9ЦК-1

Таким образом, представленный подход позволил сократить количество состояний с 15 до 6, то есть в 2,5 раза. Созданные на основе данного подхода алгоритмы контроля могут быть использованы при решении задач идентификации и технического диагностирования в условиях автономного функционирования, когда объект контроля обладает обширным спектром ресурсных ограничений (временных, энергетических).

3.2. Оценка эффективности применения адаптивных математических моделей сложных систем при решении задачи контроля и технического диагностирования. Оценку эффективности применения адаптивных математических моделей по показателю «оперативность» произведем через вычислительную сложность алгоритмов проверки исправности БС КА на основе синтезированных моделей. Известно [22], что под вычислительной сложностью алгоритма (задачи) понимается функция $S(n)$, сопоставляющая каждому набору исходных данных n некоторое абстрактное время его вычисления (решения задачи). Очевидно, что реальное время вычисления по алгоритму зависит от типа вычислительного устройства, способа программирования и профессионализма программиста. Однако учет всех этих факторов можно осуществить с помощью введения соответствующего коэффициента пропорциональности.

Для получения временных оценок алгоритма, инвариантного к типу вычислителя, часто вводят понятие элементарной операции (сложение, умножение, пересылка «регистр-регистр»). В этом случае время вычисления по алгоритму может быть оценено функцией $O(n)$, которая определяет число элементарных операций в зависимости от объема исходных данных n . Применительно к данной статье под объемом исходных данных n следует понимать мощность множества (количество) состояний исходной конечно-автоматной модели или модели с минимальным числом состояний.

Построение функции $O(n)$ позволяет в дальнейшем оценивать реальное время выполнения алгоритма для конкретного вычислителя путем умножения количества элементарных операций на время выполнения отдельной операции.

Как было отмечено ранее, проверка исправности БА, процесс функционирования которой формализован при помощи математического аппарата конечных автоматов, производится при помощи отработки программы контрольных испытаний, задающей обход всех переходов КАМ. В общем случае задача оптимального обхода всех переходов графа получила название задачи «китайского

почтальона» — нахождения кратчайшего пути обхода всех дуг графа неэйлеровой модели [22]. В свою очередь, решение задачи «китайского почтальона» подразумевает реализацию алгоритма Дейкстры с целью построения кратчайших путей и реализацию алгоритма Флери, осуществляющих эйлеров обход синтезированной модели. В качестве элементарной операции выступает сравнение двух символов (или слов), время выполнения которой примем $\Delta t_3 = 1$ мкс.

Отсюда верхнюю оценку $\overline{S(n)}$ вычислительной сложности алгоритма решения задачи «китайского почтальона» можно представить как произведение верхних оценок вычислительных сложностей алгоритмов Дейкстры и Флери [33, 34]:

$$\overline{S(n)} = O(n^2) * O(n^2) = O(n^4). \quad (19)$$

Применительно к синтезу адаптивной модели БРТС, верхняя оценка вычислительной сложности t^6 от количества состояний n для $\Delta t_3 = 1$ мкс представлена в таблице 5.

Таблица 5. Верхняя оценка вычислительной сложности алгоритма «китайского почтальона»

n	$t^6, \text{с}$
5	0,08
6	0,3
7	0,8
8	2,1
9	4,8
10	10
11	19,5
12	36
13	62,7
14	105,4
15	170,9
16	268,4
17	410,3

При определении общего времени контроля бортовых систем КА, кроме времени подачи и реализации тестовых (управляющих) воздействий (команд), измерения и оценки контрольных (телеметрируемых) параметров (выходных переменных), необходимо также учитывать время

подготовительных (t_n) и заключительных (t_3) операций при контроле. Отсюда общее время контроля [35]:

$$T_k = t_n + t_3 + t.^{\sigma} \quad (20)$$

Согласно технической документации, на подготовительные и заключительные операции ($t_n + t_3$) при проведении наземных контрольных испытаний БИТС БР-9ЦК-1 отводится до 25 минут, при проведении бортовых контрольных испытаний БИТС БР-9ЦК-1 до 1,5 минут [32, 34].

Общее время контроля при применении конечно-автоматных моделей подсистем БИТС БР-9ЦК-1с различным числом состояний при проведении наземных (T_{kn}) наземных и бортовых (T_{kb}) контрольных испытаний с учетом выражения (23) для $\Delta t_j = 1$ мкс представлены в таблице 6.

Таблица 6. Общее время контроля подсистем БИТС БР-9ЦК-1

n	T_{kn}, c	T_{kb}, c
5	≈1500	90,08
6	1500,3	90,3
7	1500,8	90,8
8	1502,1	92,1
9	1504,8	94,8
10	1510	100
11	1519,5	109,5
12	1536	126
13	1562,7	152,7
14	1605,4	195,4
15	1670,9	260,9
16	1768,4	358,4
17	1910,3	500,3

Анализ полученных результатов показывает, что применение разработанной адаптивной математической модели вида (10), с учетом отображения (2), при решении задачи контроля технического состояния БИТС БР-9ЦК-1 позволяет получить существенный выигрыш (на 15-20% при проведении наземных контрольных испытаний и в 2-3 раза при проведении бортовых контрольных испытаний БИТС БР-9ЦК-1) по показателю оперативности. Однако здесь следует обращать внимание на вопросы обеспечения требуемой достоверности контроля применительно к решаемой целевой задаче. Для приведенного конкретного примера скорость передачи информации (информативность) для различных режимов работы БРТС оказалась несущественной, достаточно было при определении вида ТС

идентифицировать сам режим. Это позволило перейти к обобщенным диагностическим признакам и тем самым уменьшить мощность множества состояний Q исходной модели практически без потери в достоверности контроля.

В тоже время, задача поиска места и определение причин отказа (неисправности), как правило, решается путем проведения программы диагностических испытаний для полной конечно-автоматной модели с фиксированным классом неисправностей, обнаруживаемых в рамках используемой модели. В данном случае показателем оптимизации обычно выступает достоверность, зависящая от размерности математической модели и ее адекватности в рамках решаемой конкретной задачи.

4. Заключение. Предложенный подход синтеза адаптивных моделей заключается в преобразовании модели процесса функционирования бортовой радиоэлектронной аппаратуры в гомологичную структуру меньшей размерности. Модель процесса функционирования основана на использовании математического аппарата конечных автоматов. Новизна подхода заключается в том, что гомологичная структура меньшей размерности синтезирована за счет преобразования отношений между элементами множества телеметрируемых (контролируемых) параметров (выходных переменных конечно-автоматной модели). При этом преобразование модели осуществляется по критерию максимума выбранного показателя качества — оперативности контроля.

Проведенный анализ вычислительной сложности алгоритма контроля центрального блока БРТС БР-9ЦК-1 показал, что применение моделей, преобразованных в гомологичную структуру меньшей размерности, для решения задачи контроля ТС позволяет получить существенный выигрыш по показателю оперативности (от 15-20% до 2-3 раз в зависимости от места проведения контрольных испытаний). Ограничением в данном случае выступает требуемая достоверность контроля.

Литература

1. *Лоскутов А.И., Клыков В.А.* Идентификация и техническое диагностирование бортовой аппаратуры автономных космических аппаратов на основе биективного преобразования множества диагностических признаков // Контроль. Диагностика. 2016. № 4. С. 57–63.
2. *Мышко В.В., Кравцо А.Н., Копкин Е.В., Чижуров А.В.* Теоретические основы и методы оптимизации анализа технического состояния сложных систем // СПб: ВКА имени А.Ф. Можайского. 2013. 303 с.
3. *Дмитриев А.К., Юсупов Р.М.* Идентификация и техническая диагностика // МО СССР. 1987. 525 с.
4. *Ambrose R. et al.* NASA technology roadmaps: TA 4: Robotics and autonomous systems // Technical report. NASA. 2015. pp. 50–58.

5. *Zotes F., Penas M.* Intelligent satellites control based on fuzzy logic in the Earth Moon Libration points // International Conference on Intelligent Systems and Knowledge Engineering (ISKE). 2010. pp. 605–610.
6. *Codetta-Raiteri D., Portinale L., Nolfo S., Guiotto A.* ARPHA: a software prototype for fault detection, identification and recovery in autonomous spacecrafts // Acta Futura. 2012. vol. 5. pp. 99–110.
7. *Wander A., Förstner R.* Innovative fault detection, isolation and recovery strategies on-board spacecraft: state of the art and research challenges // Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress. 2012. pp. 1–9.
8. *Meskin N., Khorasani K.* Fault detection and isolation: Multi-vehicle unmanned systems // New York: Springer. 2011. 166 p.
9. *Schumann J., Mengshoel O., Mbaya T.* Integrated Software and Sensor Health Management for Small // IEEE Fourth International Conference on Space Mission Challenges for Information Technology (SMC-IT). 2011. pp. 77–84.
10. *Резников Б.А.* Системный анализ и методы системотехники. Часть 1. Методология системных исследований. Моделирование сложных систем // Л.: МО СССР. 1990. 524 с.
11. *Калинин В.Н.* Теоретические основы системных исследований. Краткий авторский курс // СПб: ВКА им А.Ф. Можайского. 2013. 278 с.
12. ГОСТ 20911-89. Техническая диагностика. Термины и определения // М.: Изд-во стандартов. 1990. 12 с.
13. *Дунаев В.В. Поляков О.М., Фролов В.В.* Алгоритмические основы испытаний // Л.: МО СССР. 1991. 429 с.
14. *Копкин Е.В., Бородько Д.Н., Пастухова К.С.* Алгоритм построения квазиоптимальной гибкой программы анализа технического состояния объекта // Информационно-управляющие системы. 2017. № 1. С. 27–41.
15. *Копкин Е.В., Кобзарев И.М., Зверева Е.В.* Квазиоптимальный алгоритм построения гибкой программы анализа технического состояния объекта // Научные технологии в космических исследованиях земли. 2017. № 3. С. 4–12.
16. *Копкин Е.В., Чукуров В.А., Алейник В.В., Лазутин О.Г.* Алгоритм построения гибкой программы диагностирования технического объекта по критерию ценности получаемой информации // Труды СПИИРАН. 2015. № 4(41). С. 106–128.
17. *Копкин Е.В., Крайцов А.Н., Лазутин О.Г.* Выбор дискретных диагностических признаков с учетом их ценности для распознавания технического состояния объекта // Информация и космос. 2015. № 2. С. 111–117.
18. *Полянский В.И.* Нечеткие множества в моделях и методах диагностирования сложных технических систем: монография // М.: Полиграф сервис. 2010. 242 с.
19. *Патраков С.С., Лоскутов А.И., Фомин А.В.* Модель интеллектуальной системы управления испытаниями объектов ракетно-космической техники // Сборник тезисов докладов НТК «КБ Арсенал». 2017. С. 47–51.
20. *Лоскутов А.И., Вечеркин В.Б., Шестопалова О.Л.* Автоматизация контроля состояния сложных технических систем на основе использования конечно-автоматной модели и нейросетевых структур // Информационно-измерительные системы. 2012. № 2. С. 74–81.
21. *Козырев Г.И., Лоскутов А.И., Хаматов А.А.* Конечно-автоматная модель функционирования бортовой аппаратуры автономных космических аппаратов для контроля технического состояния с использованием нечеткой логики // Труды ВКА им. А.Ф. Можайского. 2016. Вып. 651. С. 28–39.
22. *Лоскутов А.И., Козырев Г.И.* Основы испытаний бортовых радиоэлектронных систем // СПб: ВКА им А.Ф. Можайского. 2013. 158 с.
23. *Гончаренко В.А., Грызунов В.В.* Теория автоматов. Курс лекций // СПб: ВКА им. А.Ф. Можайского. 2014. 182 с.
24. *Горбатов В.А., Горбатов А.В., Горбатова М.В.* Теория автоматов: учебник для студентов вузов // М.: АСТ: Астрель. 2008. 559 с.

25. *Кудрявцев В.Б., Алешин С.В., Подколзин А.С.* Теория автоматов: учебник для бакалавриата и магистратуры // М. Юрайт. 2017. 320 с.
26. *Лоскутов А.И., Клыков В.А.* Синтез минимальной формы конечно-автоматной модели функционирования бортовых радиоэлектронных систем космических аппаратов по обобщенным диагностическим признакам // Измерение. Мониторинг. Управление. 2016. № 4. С.85–95.
27. *Дунаев В.В.* Занимательная математика. Множества и отношения // СПб: БХВ-Петербург. 2008. 336 с.
28. *Дунаев, В.В.* Классификационные основы теории испытаний // Л.: МО СССР. 1984. 145 с.
29. *Лоскутов А.И., Клыков В.А.* Методика синтеза математической модели функционирования бортовых систем изделий ракетно-космической техники на основе логической декомпозиции // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2016. № 5. С. 7–18.
30. *Телеметрические системы разгонного блока «Фрегат»* // ФГУП НПО им. С.А. Лавочкина. 2007. 127 с.
31. 14С44 ДПМ ч. 1. Программа телеметрических измерений. Ч.1. Измерения системы БР-9ЦК-1. ФГУП НПО им. С.А. Лавочкина. 2007. 32 с.
32. 14С44 ИЭ20 ч. 1. Изделие 14С44. Инструкция по оценке работы бортовых систем. Оценка работы системы БР-9ЦК-1. Часть 1. ФГУП НПО им. С.А. Лавочкина. 2007. 21 с.
33. *Кормен Т., Лейзерсон Ч., Ривест Р.* Алгоритмы: построение и анализ // М.: МЦНМО. 2001. 960 с.
34. *Дольников В.Л. Якимов О.П.* Основные алгоритмы на графах: текст лекций // Ярославль: ЯрГУ. 2011. 80 с.
35. *Кочелаев Ю.С.* Автоматизированные испытательные комплексы. Выпуск 3. Оптимизация алгоритмов автоматизированного тестового контроля: учебное пособие // СПб.: МО РФ. 1992. 118 с.

Лоскутов Андрей Иванович — д-р техн. наук, доцент, начальник кафедры телеметрических систем и комплексной обработки информации, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского (ВКА им. А.Ф. Можайского). Область научных интересов: телеметрия, защита информации, идентификация, контроль и диагностика сложных технических систем, искусственный интеллект. Число научных публикаций — 72. rujenz@mail.ru; Ждановская, 13, Санкт-Петербург, 197198; р.т.: +7(812)235-95-34.

Козырев Геннадий Иванович — д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры телеметрических систем и комплексной обработки информации, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского (ВКА им. А.Ф. Можайского). Область научных интересов: защита информации, идентификация, контроль и диагностика сложных технических систем, методы повышения точности измерений. Число научных публикаций — 141. genkozyrev@yandex.ru; Ждановская, 13, Санкт-Петербург, 197198; р.т.: +7(812)235-95-34.

Клыков Владимир Алексеевич — адъюнкт кафедры телеметрических систем и комплексной обработки информации, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского (ВКА им. А.Ф. Можайского). Область научных интересов: идентификация, контроль и диагностика сложных технических систем. Число научных публикаций — 16. v.klikoff86@mail.ru; Ждановская, 13, Санкт-Петербург, 197198; р.т.: +7(812)235-95-34.

Шестопалова Ольга Львовна — к-т техн. наук, доцент, декан факультета испытания летательных аппаратов филиала «Восход», Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) (МАИ). Область научных интересов: методы повышения надежности и безопасности ракетно-космической техники, методы управления развитием сложных территориально-распределенных комплексов. Число научных публикаций — 159. neman2004@mail.ru; пр. Гагарина, 5, Байконур, Кызыл-Ординская обл., 468320, Казахстан; р.т.: +7(33622)5-15-22.

**A.I. LOSKUTOV, G.I. KOZYREV, V.A. KLYKOV, O.L. SHESTOPALOVA
SYNTHESIS OF ADAPTIVE MATHEMATICAL MODELS OF
ONBOARD ELECTRONIC SYSTEMS OF THE SPACECRAFT
THROUGH THE APPLICATION OF MATHEMATICAL
HOMOLOGOUS STRUCTURES**

Loskutov A.I., Kozyrev G.I., Klykov V.A., Shestopalova O.L. **Synthesis of Adaptive Mathematical Models of Onboard Electronic Systems of the Spacecraft Through the Application of Mathematical Homologous Structures.**

Abstract. The article discusses the issues of the synthesis of adaptive mathematical models applied to the problems of technical diagnostics of on-board electronic systems of the spacecraft. The authors formulated the problem of the synthesis of adaptive models of on-board radio-electronic systems of spacecraft in a general form using the transformation of the source mathematical structure into the homologous structure with smaller dimension. An approach to the synthesis of adaptive models on the basis of using mathematical apparatus of finite state machines is presented. The novelty of the approach lies in the fact that a homologous structure with smaller dimension is synthesized by transformation of the relations between the elements of a set of controlled parameters (output variables of FSM model). An example of the synthesis of the mathematical model of the on-board telemetry system's central unit, adaptive to the control process of technical condition, is given. Efficiency of the synthesized adaptive model of on-board radio-electronic systems was evaluated by solving the Chinese postman problem.

Keywords: technical diagnostics, control, onboard equipment, spacecraft, mathematical model, finite state machine.

Loskutov Andrey Ivanovich — Ph.D., Dr. Sci., associate professor, head of telemetric systems and complex information processing department, Mozhaisky Military Space Academy. Research interests: telemetry, protection, identification, control and diagnosis of complex technical systems, artificial intelligence. The number of publications — 72. rujenz@mail.ru; 13, Zhdanovskaya street, St.-Petersburg, 197198, Russia; office phone: +7(812)235-95-34.

Kozyrev Gennadij Ivanovich — Ph.D., Dr. Sci., professor, professor of telemetric systems and complex information processing department, Mozhaisky Military Space Academy. Research interests: telemetry, protection, identification, control and diagnosis of complex technical systems, methods of increase of accuracy of measurements. The number of publications — 141. gen-kozyrev@yandex.ru; 13, Zhdanovskaya street, St.-Petersburg, 197198, Russia; office phone: +7(812)235-95-34.

Klykov Vladimir Alekseevich — Ph.D. student of telemetric systems and complex information processing department, Mozhaisky Military Space Academy. Research interests: identification, control and diagnosis of complex technical systems. The number of publications — 16. v.klikoff86@mail.ru; 13, Zhdanovskaya street, St.-Petersburg, 197198, Russia; office phone: +7(812)235-95-34.

Shestopalova Olga L'vovna — Ph.D., associate professor, dean of test of aircraft faculty of "Sunrise" branch, Moscow Aviation Institute (MAI). Research interests: methods to improve the reliability and safety of rocket and space technology, management methods development of complex geographically distributed systems. The number of publications — 159. neman2004@mail.ru; 5, Gagarina pr., Baikonur, 468320, Kazakhstan; office phone: +7(33622)5-15-22.

References

1. Loskutov A.I., Klykov V.A. [Identification and technical diagnostics of onboard equipment of Autonomous spacecraft based on bijective transformations of the set of diagnostic features]. *Kontrol'. Diagnostika – Testing. Diagnostics*. 2016. vol. 4. pp. 57–63. (In Russ.).

2. Myshko V.V., Kravtsov A.N., Kopkin E.V., Chikurov A.V. *Teoreticheskie osnovy i metody optimizatsii analiza tekhnicheskogo sostoyaniya slozhnykh sistem* [Theoretical bases and methods of optimization of the analysis of technical condition of difficult systems]. SPb: VKA imeni A.F. Mozhajskogo. 2013. 303 p. (In Russ.).
3. Dmitriev A.K., Yusupov R.M. *Identifikatsiya i tekhnicheskaya diagnostika* [Identification and technical diagnostics]. MO SSSR. 1987. 525 p. (In Russ.).
4. Ambrose R. et al. NASA technology roadmaps: TA 4: Robotics and autonomous systems. Technical report. NASA. 2015. 2015. pp. 50–58.
5. Zotes F., Penas M. Intelligent satellites control based on fuzzy logic in the Earth Moon Libration points International Conference on Intelligent Systems and Knowledge Engineering (ISKE). 2010. pp. 605–610.
6. Codetta-Raiteri D., Portinale L., Nolfo S., Guiotto A. ARPHA: a software prototype for fault detection, identification and recovery in autonomous spacecrafts. *Acta Futura*. 2012. vol. 5. pp. 99–110.
7. Wander A., Förstner R. Innovative fault detection, isolation and recovery strategies on-board spacecraft: state of the art and research challenges. Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress. 2012. pp. 1–9.
8. Meskin N., Khorasani K. Fault detection and isolation: Multi-vehicle unmanned systems. New York: Springer. 2011. 166 p.
9. Schumann J., Mengshoel O., Mbaya T. Integrated Software and Sensor Health Management for Small. IEEE Fourth International Conference on Space Mission Challenges for Information Technology (SMC-IT). 2011. pp. 77–84.
10. Reznikov B.A. *Sistemnyy analiz i metody sistemotekhniki. CHast' 1. Metodologiya sistemnykh issledovaniy. Modelirovanie slozhnykh sistem* [System analysis and methods of systems engineering. Part 1. The methodology of system research. Modeling of complex systems]. L.: MD. 1990. 524 p. (In Russ.).
11. Kalinin V.N. *Teoreticheskie osnovy sistemnykh issledovaniy. Kratkij avtorskiy kurs* [The theoretical basis of system studies. A short author's course]. SPb: VKA imeni A.F. Mozhajskogo. 2013. 278 p. (In Russ.).
12. *GOST 20911-89. Tehnicheskaja diagnostika. Terminy i opredelenija* [State Standard 20911-89. Technical diagnostics. Terms and definitions]. M. Standarty. 1991. 12 p. (In Russ.).
13. Dunaev V.V., Polyakov O.M., Frolov V.V. *Algoritmicheskie osnovy ispitaniy* [Algorithmic foundations of testing]. L.: MO SSSR. 1991. 429 p. (In Russ.).
14. Kopkin E.V., Borodko D.N., Pastuhova K.S. [The algorithm for constructing quasi-optimal flexible program of analysis of the technical state of the object]. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy – Information and Control Systems*. 2017. vol. 1. pp. 27–41. (In Russ.).
15. Kopkin E.V., Kobzarev I.M., Zvereva E.V. [Quasi-optimal algorithm for a flexible program of analysis of the technical state of the object]. *Hi-tech earth space research – Naukoemkie tehnologii v kosmicheskikh issledovaniyakh zemli*. 2017. vol. 3. pp. 4–12. (In Russ.).
16. Kopkin E.V., Chikurov V.A., Aleinik V.V., Lazutin O.G. [The algorithm for constructing a flexible program of diagnosing a technical object according to the criterion of the value of the received information]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*. 2015. vol. 4(41). pp. 106–128. (In Russ.).
17. Kopkin E.V., Kravcov A.N., Lazutin O.G. [The choice of discrete diagnostic characters based on their value for recognition of a technical condition of object]. *Informatsiya i kosmos – Information and Space*. 2015. vol. 2. pp. 111–117. (In Russ.).
18. Polyanskii V.I. *Nechetkie mnojestva v modelyakh i metodah diagnostirovaniya slozhnykh tekhnicheskikh sistem: monografiya* [Fuzzy sets in models and methods of diagnosis of complex technical systems: monograph]. M. Poligraf servis. 2010. 242 p. (In Russ.).

19. Patrakov S.S., Loskutov A.I., Fomin A.V. [The model of intellectual control system testing of space hardware]. *Sbornik tezisev dokladov NTK «KB Arsenal»* [The book of abstracts and reports of NTK «KB Arsenal»]. 2017. pp. 47–51. (In Russ.).
20. Loskutov A.I., Vecherkin V.B., Shestopalova O.L. [Automating condition monitoring of complex technical systems based on the use of finite-automaton model and neural network structures]. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy – Information and Control Systems*. 2012. vol. 2. pp. 74–81. (In Russ.).
21. Kozirev G.I., Loskutov A.I., Hamatov A.A. [Finite-automaton model of functioning of onboard equipment of Autonomous spacecraft for control of technical condition using fuzzy logic]. *Proceedings of the Mozhaisky Military Space Academy*. 2016. vol. 651. pp. 28–39. (In Russ.).
22. Loskutov A.I., Kozirev G.I. *Osnovy ispytaniy bortovyykh radioelektronnykh sistem* [Bases of tests of onboard radio-electronic systems]. SPb: VKA imeni A.F. Mozhajskogo. 2013. 158 p. (In Russ.).
23. Goncharenko V.A. *Teoriya avtomatov. Kurs lektsij* [Automata theory. A course of lectures]. SPb: VKA imeni A.F. Mozhajskogo. 2014. 182 p. (In Russ.).
24. Gorbatov V.A. *Teoriya avtomatov: uchebnyk dlya studentov vtuzov* [Automata theory: textbook for students of technical colleges]. M.: AST: Astrel. 2008. 559 p. (In Russ.).
25. Kudryavcev V.B., Aleshin S.V., Podkolzin A.S. *Teoriya avtomatov: uchebnyk dlya bakalavriata i magistraturi* [Automata theory: textbook for undergraduate and graduate]. M. Yurait. 2017. 320 p. (In Russ.).
26. Loskutov A.I. Klykov V.A. [Synthesis of minimal forms of finite-automaton model of functioning of onboard electronic systems of space vehicles according to the diagnostic criteria]. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie – Dimension. Monitoring. Management*. 2016. vol. 4. pp. 85–95. (In Russ.).
27. Dunaev V.V. *Zanimatel'naya matematika. Mnozhestva i otnosheniya* [Entertaining mathematics. Sets and relations]. St. Petersburg: BHV-Peterburg. 2008. 336 p. (In Russ.).
28. Dunaev V.V. *Klassifikatsionnye osnovy teorii ispytaniy* [Classification of the basic theory test]. L.: MO SSSR. 1984. 145 p. (In Russ.).
29. Loskutov A.I. Klykov V.A. [The technique of synthesis of mathematical model of functioning of onboard systems of the rocket and space technology on the basis of logical decomposition]. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika – Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics*. 2016. vol. 5. pp. 7–18. (In Russ.).
30. *Telemetricheskie sistemy razgonnogo bloka «Fregat»* [The telemetry system of the upper stage "Fregat"]. FGUP NPO im. S.A. Lavochkina. 2007. 127 p. (In Russ.).
31. *14S44 DPM ch.1. Programma telemetricheskikh izmereniy. CH.1. Izmereniya sistemy BR-9CK-1* [14S44 DPM p.1. Program telemetry measurements. Part 1. Measurement system]. FGUP NPO im. S.A. Lavochkina. 2007. 32 p. (In Russ.).
32. *14S44 IE20 ch.1 – Izdelie 14S44. Instrukciya po ocenke raboty bortovykh sistem. Ocenka raboty sistemy BR-9CK-1. Chast' 1* [14S44 IE20 ch.1 – Product 14S44. Manual of on-Board systems. The performance evaluation system]. FGUP NPO im. S.A. Lavochkina. 2007. 21 p. (In Russ.).
33. Kormen T., Leizerson Ch., Rivest R. *Algoritmi postroenie i analiz* [Algorithms: construction and analysis]. M. MCNMO. 2001. 960 p. (In Russ.).
34. Dolnikov V.L. Yakimova O.P. *Osnovnye algoritmi na grafhah: tekst lektsii* [Basic algorithms on graphs: text of the lectures]. Yaroslavl. YarGU. 2011. 80 p. (In Russ.).
35. Kochelaev Y.S. *Avtomatizirovannye ispitatelnye kompleksi. Vypusk 3. Optimizatsiya algoritmov avtomatizirovannogo testovogo kontrolya: uchebnoe posobie* [Automated test complexes. Volume 3. Optimization of algorithms for automated test control: tutorial]. SPb.: MO RF. 1992. 118 p. (In Russ.).

М.С. ЛЫТАЕВ

ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ТРОПОСФЕРНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН В ЗАДАЧАХ ПОСТРОЕНИЯ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ ДИСТАНЦИОННОГО МОНИТОРИНГА

Лытаев М.С. Численный метод расчета тропосферного распространения электромагнитных волн в задачах построения геоинформационных систем дистанционного мониторинга.

Аннотация. Настоящая работа посвящена численным методам решения задачи распространения электромагнитных волн вблизи поверхности Земли. Построены дискретные нелокальные граничные условия для конечно-разностной аппроксимации Паде однонаправленного уравнения Гельмгольца. Полученные условия позволяют учитывать линейно растущий по высоте коэффициент преломления выше расчетной области, что делает их полезными для применения в задачах распространения радиоволн в неоднородной тропосфере. Предложенный метод не требует введения искусственного поглощающего слоя в окрестности верхней границы расчетной области. Использование аппроксимаций Паде позволяет проводить расчеты с достаточно большим шагом по продольной координате, что положительно влияет на производительность. Метод не накладывает существенных ограничений на максимальный угол распространения и может использоваться в среде с наличием горизонтальных препятствий. Выполнено сравнение с методом расщепления Фурье и конечно-разностной схемой Кранка — Николсона.

Ключевые слова: нелокальное граничное условие, распространение радиоволн, уравнение Гельмгольца, аппроксимации Паде, параболическое уравнение.

1. Введение. Интеллектуальные географические информационные системы для мониторинга и поддержки принятия решений все чаще проникают в различные отрасли. В задачи этих сложных распределенных систем входит сбор данных из различных источников в реальном времени, классификация, обработка и визуализация наблюдаемой обстановки в удобном виде. Появляется возможность для осуществления широкомасштабного мониторинга и моделирования различных процессов антропогенного и природного характера [1].

Одним из основных источников наблюдения уже долгое время является анализ электромагнитного излучения. Следует отметить, что в задачах мониторинга земной поверхности за последние несколько лет получили развитие методы анализа интерференционных диаграмм, создаваемых сигналами глобальных навигационных систем ГЛОНАСС и GPS [2]. Сюда входит наблюдение за передвижением и толщиной льда на морях и реках [3], определение влажности почвы и уровня растительности, измерение глубины снежного покрова. Для корректного моделирования и обработки спутниковых сигналов необходимы методы расчета распространения электромагнитных волн вблизи поверхности Земли, способные учитывать различные параметры наблюдаемой среды [4].

Математическое моделирование тропосферного распространения радиоволн также находят широкое применение в задачах прогнозирования зон радиовидимости различных радиотехнических систем [5-7]. Пространственные изменения индекса преломления тропосферы, обусловленные метеорологическими условиями, оказывают существенное влияние на распространение радиоволн [8, 9]. Эффекты аномального тропосферного распространения способны как значительно увеличить зону радиовидимости, так и способствовать появлению слепых зон. Кроме того, важно учитывать эффекты дифракции вокруг поверхности Земли, параметры ландшафта земной поверхности и условия городской застройки [10].

В интересах ВМС США уже много лет разрабатывается и активно используется система AREPS [11]. В список ее возможностей входит расчет функции ослабления радиоволн в различных условиях, оценка вероятности обнаружения радарными надводных и воздушных целей, определение зон действия наземных систем радиодоступа. К настоящему времени AREPS является составной частью интеллектуальных систем мониторинга и боевого управления.

Для решения указанных задач расчета характеристик распространения электромагнитных волн, как правило, используется метод параболического уравнения [12-14]. Анализ вышеупомянутых систем и используемых в них алгоритмов построения численного решения показывает, что они обладают определенными недостатками [15]. В частности, особенности построения решения в полубесконечном интервале высот исследованы недостаточно, что приводит к появлению ложных отражений от верхней границы расчетной области. Введение искусственного поглощающего слоя в окрестности верхней границы способно на несколько порядков уменьшить влияние ложных отражений, однако его эффективность зависит от конкретных параметров излучающей антенны, ландшафта и коэффициента преломления среды. Кроме того, параметры самого слоя определяются не строго, а исходя из некоторых эмпирических соображений и, таким образом, требуют калибровки и верификации.

Альтернативным подходом является использование конечно-разностных схем с введением нелокальных граничных условий (НГУ), которые позволяют свести исходную задачу к эквивалентной с ограниченной по высоте областью интегрирования. В задаче тропосферного распространения для стандартного узкоугольного параболического приближения данный подход был впервые предложен в работе [16]. Далее был получен дискретный вариант нелокального граничного условия для численной схемы Кранка — Николсона [17]. Стандартная

схема Кранка — Николсона показывает весьма точные результаты при отсутствии горизонтальных препятствий, однако в некоторых случаях требует использования достаточно густой расчетной сетки, что отрицательно влияет на производительность [18]. Для учета эффектов рассеяния на неоднородностях ландшафта или городской застройки необходимо применять более точные методы [12], например используемые в гидроакустике аппроксимации Паде уравнения Гельмгольца.

Следует отметить, что метод нелокальных граничных условий для решения аналогичных задач в неограниченной области широко применяется в гидроакустике и квантовой механике [19, 20]. Существует серия работ, посвященная нелокальным граничным условиям для рациональных аппроксимаций Паде уравнения Гельмгольца в задачах гидроакустики, когда неоднородность вне области интегрирования можно считать константой [21-23]. Дополнительную сложность в задаче тропосферного распространения создает тот факт, что эффективный индекс преломления, позволяющий учитывать кривизну земной поверхности, является линейно растущей функцией.

Целью настоящего исследования является построение и анализ дискретного нелокального граничного условия для аппроксимации Паде уравнения Гельмгольца, учитывающего линейно растущий коэффициент преломления.

Поясним структуру данной работы. В разделе 2 представлена постановка задачи распространения электромагнитных волн вблизи земной поверхности с известной диаграммой направленности излучающей антенны, параметрами земной поверхности и индексом преломления тропосферы. Раздел 3 посвящен параболическому уравнению и обзору известных методов его численного решения. В разделе 4 сформирована численная схема построения решения задачи при помощи метода рациональных аппроксимаций Паде. Разделе 5 посвящен дискретному нелокальному граничному условию для построенной ранее численной схемы. В разделе 6 приведены результаты численного моделирования и выполнено сравнение с существующими подходами.

2. Постановка задачи. Задача распространения монохроматических электромагнитных волн вблизи земной поверхности заключается в нахождении комплексного поля $\psi(x, z)$ в полубесконечной области $\Omega = \{0 \leq x < \infty, 0 \leq z < \infty\}$. Функция $\psi(x, z)$, записанная в переменных Пекериса [12], удовлетворяет уравнению Гельмгольца:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} + k_0^2 m^2(x, z) \psi = 0, \quad (1)$$

где $k_0 = 2\pi / \lambda$ — волновое число в вакууме, λ — длина волны, $m^2(x, z) = 1 + 2N(x, z) + 2z / R$, $N(x, z)$ — индекс преломления тропосферы, R — радиус Земли. Поле $\psi(x, z)$ отвечает азимутальной компоненте электрического или магнитного поля для вертикальной или горизонтальной поляризации соответственно.

Обычно предполагается, что индекс преломления тропосферы не претерпевает существенных изменений на высотах больше нескольких километров. Таким образом, можно считать, что функция $N(x, z)$ финитна и обращается в ноль при $z > z_b$.

Функция $\psi(x, z)$ удовлетворяет импедансному граничному условию на поверхности Земли:

$$\left(q_1 \frac{\partial \psi}{\partial z} + q_2 \psi \right) \Big|_{z=0} = 0, \quad (2)$$

где q_1 и q_2 — комплексные числа, которые выражаются через проводимость σ и диэлектрическую проницаемость ϵ подстилающей поверхности следующим образом:

$$q_2 = \begin{cases} (\epsilon + i60\sigma\lambda)^{1/2} & \text{горизонтальная поляризация} \\ (\epsilon + i60\sigma\lambda)^{-1/2} & \text{вертикальная поляризация} \end{cases},$$

$$q_1 = 1.$$

Также требуется, чтобы:

$$\psi \Big|_{z \rightarrow +\infty} = 0. \quad (3)$$

Характерной особенностью рассматриваемой задачи является тот факт, что волновое поле порождается начальным условием:

$$\psi(0, z) = \psi_0(z) \quad (4)$$

с некоторой известной функцией $\psi_0(z)$, отвечающей диаграмме направленности антенны. В качестве $\psi_0(z)$ часто выбирается Гауссов пучок, определяемый соотношением [12]:

$$\psi_0(z) = \frac{k_0 \beta}{2\sqrt{\pi} \log 2} \exp(-ik_0 \theta z) \exp\left(-\frac{\beta^2}{8 \log 2} k_0^2 (z - z_0)^2\right),$$

где z_0 — высота источника, β — ширина диаграммы направленности и θ — угол наклона антенны.

3. Метод параболического уравнения. Осуществляя переход к парааксиальному приближению при помощи замены $u(x, z) = e^{-ik_0x} \psi(x, z)$, уравнение (1) запишется относительно функции $u(x, z)$ в виде:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + 2ik_0 \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + k_0^2 (m^2(x, z) - 1)u = 0. \quad (5)$$

Следуя общепринятой методологии [12], можно записать уравнение для волн, распространяющихся в положительном направлении по продольной координате:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = ik(\sqrt{1+L} - 1)u, \quad (6)$$

$$Lu = \frac{1}{k^2} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + (m^2 - 1)u.$$

Уравнение (6) примет вид стандартного параболического уравнения Леонтовича — Фока [24] после замены квадратного корня его разложением по формуле Тейлора до слагаемого первого порядка. Применяв для квадратного корня аппроксимацию Паде [25] порядка [1/1], можно получить широкоугольное параболическое уравнение (Claerbout approximation) [12].

Наибольшую популярность для построения численного решения параболического уравнения в задачах распространения радиоволн приобрел метод расщепления Фурье (split-step Fourier method) [12]. Он позволяет строить решения для стандартного и широкоугольного параболического уравнения. Достоинством метода является возможность выбирать достаточно большие расстояния между узлами расчетной сетки по продольной и поперечной координате, что хорошо сказывается на производительности. Главным недостатком метода является трудоемкий учет граничных условий. Для учета нижнего импедансного условия (2) необходимо использовать метод смешанного преобразования Фурье [12], численная реализация которого является условно устойчивой. Это накладывает ограничения на минимальный шаг сетки и приводит к расходимости, например, при расчете поля над сильно взволнованной морской поверхностью [13]. Кроме того, для устранения ложных отражений от верхней границы расчетной области необходимо использовать искусственный поглощающий слой [12, 13], параметры которого не могут быть определены строго. Таким образом,

определить точность получаемого решения в некоторых случаях бывает весьма затруднительно.

Другим часто используемым подходом является использование конечно-разностной схемы Кранка — Николсона для тех же видов параболического уравнения. Условие (2) в этом случае выводится непосредственно [12] и не приводит к неустойчивым решениям. Кроме того, для конечно-разностной схемы возможно построение дискретного НГУ на верхней границе расчетной области, что снимает необходимость введения искусственного поглощающего слоя. Недостатком метода является необходимость использовать меньшую расчетную сетку по сравнению с методом расщепления Фурье, что требует несколько больших вычислительных затрат. Аппроксимации Паде высокого порядка, использованные в настоящей работе, призваны частично решить эту проблему.

Следует учитывать, что имеется теоретическое обоснование однонаправленного уравнения Гельмгольца и его параболических приближений [26, 27].

4. Решение методом расщепления Паде. Пошаговое решение уравнения (6) для волн, распространяющихся в положительном направлении, формально записывается следующим образом:

$$u(x + \Delta x, z) = \exp\left(ik_0\Delta x(\sqrt{1+L}) - 1\right)u(x, z). \quad (7)$$

В работе [28] предложен метод аппроксимации операторной экспоненты (7) при помощи аппроксимаций Паде [25]. Запишем аппроксимацию Паде порядка $[n / m]$ в виде:

$$e^{ik_0\Delta x(\sqrt{1+L}-1)} \approx \frac{\prod_{l=1}^n 1 + a_l L}{\prod_{l=1}^m 1 + b_l L}. \quad (8)$$

Точность аппроксимации (8) влияет на максимальный угол распространения и максимально допустимый шаг Δx при построении численного решения.

Обозначим решение уравнения (6) на расстоянии $n\Delta x$ как u^n . Тогда пошаговое решение запишется в виде:

$$u^{n+1} = \prod_{l=1}^p \frac{1 + a_l L}{1 + b_l L} u^n, \quad (9)$$

где $p = \max(n, m)$, $a_{p+1}, \dots, a_n, b_{p+1}, \dots, b_n = 0$.

Вводя вспомогательные функции $v_1^{n+1}, v_2^{n+1}, \dots, v_{p-1}^{n+1}$, отвечающие граничным условиям (2) и (3), перепишем (7) в виде системы p дифференциальных уравнений второго порядка:

$$\begin{cases} (1+b_1L)v_1^n = (1+a_1L)u^{n-1} \\ (1+b_lL)Lv_l^n = (1+a_lL)v_{l-1}^n \quad l = 2, \dots, p-1. \\ (1+b_1L)Lu^n = (1+a_1L)v_{p-1}^n \end{cases} \quad (10)$$

Введем равномерную сетку по переменной z с шагом h и выпишем дискретный аналог оператора L :

$$L_h u_j^n = k_0^{-2} D_h^2 u_j^n + \alpha_j^n u_j^n,$$

где $\alpha_j^n = m^2(n\Delta x, jh)$.

Дискретный оператор дифференцирования D_h^2 с учетом импедансного условия (2) запишется следующим образом:

$$D_h^2 u_0^n = \frac{q_2 h - q_1}{q_1 h^2} u_0^n + \frac{2}{h^2} u_1^n,$$

$$D_h^2 u_j^n = \frac{u_{j+1}^n - 2u_j^n + u_{j-1}^n}{h^2} = \frac{\partial^2 u^n}{\partial z^2} + O(h^2), j \geq 1.$$

Заменяя оператор L конечно-разностным аналогом, приходим к системе уравнений:

$$\begin{cases} -a_1 D_h^2 u_j^{n-1} + b_1 D_h^2 v_{j,1}^n = k_0^2 (1+a_1 \alpha_j^n) u_j^{n-1} - k_0^2 (1+b_1 \alpha_j^n) v_{j,1}^n \\ -a_l D_h^2 v_{j,l-1}^n + b_l D_h^2 v_{j,l}^n = k_0^2 (1+a_l \alpha_j^n) v_{j,l-1}^n - k_0^2 (1+b_l \alpha_j^n) v_{j,l}^n \\ \dots \\ -a_p D_h^2 v_{j,p-1}^n + b_p D_h^2 u_j^n = k_0^2 (1+a_p \alpha_j^n) v_{j,p-1}^n - k_0^2 (1+b_p \alpha_j^n) u_j^n \end{cases} \quad ; \quad (11)$$

$$l = 2, \dots, p-1.$$

Система (11) решается последовательно. Каждое из равенств в (11) представляет собой систему линейных алгебраических уравне-

ний с трехдиагональной матрицей, которое решается методом прогонки за линейное время.

Основанная на аппроксимации Паде численная схема (11) является устойчивой при условии $0 \leq m - n \leq 2$ [29]. Если дополнительно потребовать строгое неравенство $m > n$, то можно показать [12], что ошибки округления, связанные с появлением эванесцентных волн, будут затухать в процессе вычисления. Далее в расчетных примерках использовалась схема $[n - 1/n]$.

5. Дискретное НГУ. Впервые НГУ для параболического уравнения, способное учитывать линейно растущий индекс преломления, предложено в работе [16]. Недостатки этого подхода, связанные с плохой согласованностью сеточной схемы и построенного НГУ, были устранены в работе [17], где, как и в настоящей работе, нелокальное условие выписывается непосредственно для численной схемы. Для широкоугольного параболического уравнения дискретное НГУ исследовалось в работе [30]. Серия исследований [21-23] посвящена изучению НГУ для аппроксимаций Паде в задачах гидроакустики с постоянным индексом преломления вне расчетной области. Также следует упомянуть работу [20], в которой НГУ для линейного уравнения Шредингера с линейно растущим потенциалом выписаны без использования специальных функций.

Обозначим верхнюю границу интересующей области интегрирования, как $z_b = Jh$. Далее предполагается, что функция $\psi_0(z)$, отвечающая начальному условию (4), и коэффициент преломления $N(x, z)$ обращаются в ноль при $z \geq z_b$. Перепишем функцию $m^2(x, z)$ в виде:

$$m^2(x, z) = 1 + 2N(x, z) + \beta + \gamma z.$$

Тогда при $j \geq J$ оператор L_h примет вид:

$$L_h u_j^n = k_0^{-2} D_h^2 u_j^n + (\beta + \gamma jh) u_j^n.$$

Применим к системе уравнений (11) при $j \geq J$ z-преобразование по продольной координате, определяемое следующим образом:

$$\mathcal{Z}\{u_j^n\} = \hat{u}_j(\xi) = \sum_{n=0}^{\infty} \xi^{-n} u_j^n,$$

где $\zeta \in \mathbb{C}$, $|\zeta| > R_c$, R_c — радиус сходимости.

Запишем полученную систему в матричной форме относительно вектора $\widehat{\Psi}_j = (\widehat{\phi}_{j,1} \ \dots \ \widehat{\phi}_{j,p-1} \ \widehat{\psi}_j)$:

$$\mathbf{A} D_h^2 \widehat{\Psi}_j = k_0^2 (\mathbf{B} - (\beta + \gamma j h) \mathbf{A}) \widehat{\Psi}_j, \quad (12)$$

где

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \xi b_1 & & & & -a_1 \\ -a_2 & b_2 & & & \\ & \ddots & \ddots & & \\ & & -a_{p-1} & b_{p-1} & \\ & & & -a_p & b_p \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} -\xi & & & & 1 \\ 1 & -1 & & & \\ & \ddots & \ddots & & \\ & & & 1 & -1 \\ & & & & 1 & -1 \end{pmatrix}.$$

Выпишем решение обобщенной задачи на собственные значения для матриц \mathbf{A} и \mathbf{B} :

$$\mathbf{B} = \mathbf{A} \mathbf{P} \mathbf{J} \mathbf{P}^{-1}, \quad (13)$$

где $\mathbf{J} = \text{diag}\{s_1, s_2 \dots s_p\}$, \mathbf{P} — матрица, составленная из правых собственных векторов. s_i являются корнями характеристического многочлена:

$$|\mathbf{B} - \lambda \mathbf{A}| = \xi \prod_{l=1}^p (\lambda b_l - 1) - \prod_{l=1}^p (\lambda a_l - 1),$$

который имеет p различных корней [22].

Для вычисления матриц \mathbf{P} и \mathbf{J} наиболее эффективно использовать обобщенное разложение Шура [31].

После замены $\widehat{\Psi}_j = \mathbf{P} \widehat{\chi}_j$, система уравнений (12) запишется в виде:

$$D_h^2 \hat{\chi}_j = k_0^2 (\mathbf{J} - (\beta + \gamma j h \mathbf{I})) \hat{\chi}_j. \quad (14)$$

Система (14) состоит из p независимых разностных уравнений:

$$D_h^2 \chi_{j,l} = k_0^2 (s_l - \beta - \gamma j h) \chi_{j,l}. \quad (15)$$

Рассмотрим сначала случай $\gamma = 0$. Тогда то из решений уравнения (15), которое стремится к нулю при $j \rightarrow +\infty$, запишется в виде $\chi_{j,l} = \mu_l^j$, где $|\mu_l| < 1$ выбирается из равенства $\mu_l - 2 + \mu_l^{-1} = k_0^2 h^2 (s_l - \beta)$. Далее легко выписать соотношения:

$$\begin{aligned} \hat{\Psi}_{J-1} &= \hat{\mathbf{D}}(\xi) \hat{\Psi}_J, \\ \hat{\mathbf{D}}(\xi) &= \mathbf{P} \text{diag} \{ \mu_1^{-1}, \mu_2^{-1}, \dots, \mu_p^{-1} \} \mathbf{P}^{-1}. \end{aligned}$$

Вернемся теперь к общему случаю $\gamma \neq 0$. Разностное соотношение (15) представляет собой дискретный вариант уравнения Эйри. Следуя работе [14], его решение может быть выписано в явном виде

$$\begin{aligned} \chi_{j,l} &= J_{\sigma_{j,l}} \left(-\frac{2}{k_0^2 h^3 \gamma} \right), \\ \sigma_{j,l} &= j - (2 + w_l + \beta) / k_0^2 h^3 \gamma, \end{aligned}$$

где J — функция Бесселя первого рода.

Матрица $\hat{\mathbf{D}}(\xi)$ в этом случае примет вид:

$$\hat{\mathbf{D}}(\xi) = \mathbf{P} \text{diag} \left\{ \frac{\chi_{J-1,1}}{\chi_{J,1}}, \frac{\chi_{J-1,2}}{\chi_{J,2}}, \dots, \frac{\chi_{J-1,p}}{\chi_{J,p}} \right\} \mathbf{P}^{-1}.$$

Диагональные элементы $\chi_{J-1,l} / \chi_{J,l}$ представляют собой отношение функций Бесселя, которое может быть эффективно вычислено алгоритмом Ленца [32] путем разложения в цепную дробь.

Применяя обратное z -преобразование, с учетом финитности функции $\psi_0(z)$, приходим к дискретному нелокальному граничному условию вида:

$$\Psi_{J-1} - \mathbf{D}^0 \Psi_J^n = \sum_{m=1}^{n-1} \mathbf{D}^m \Psi_J^{n-m}, \quad (16)$$

где

$$\mathbf{D}^m = \frac{\tau^m}{2\pi} \int_0^{2\pi} \widehat{\mathbf{D}}(\tau e^{i\varphi}) e^{im\varphi} d\varphi, \tau > 1. \quad (17)$$

Вычисление матрицы $\widehat{\mathbf{D}}(\xi)$ представляет собой трудоемкую операцию, число которых желательно минимизировать. Для эффективного вычисления обратного преобразования (17) был использован адаптивный алгоритм численного интегрирования, основанный на аппроксимации подынтегральной функции полиномами Чебышева произвольного порядка [33].

По аналогии с работой [22] можно показать, что интеграл $\int_0^{2\pi} \mathbf{P}(\tau e^{i\varphi}) d\varphi$ представляет собой нижнетреугольную матрицу. Значит, матрица \mathbf{D}^0 также является нижнетреугольной, что дает возможность применять нелокальное условие (16) последовательно для функций $v_{j,1}^{n+1}, v_{j,2}^{n+1}, \dots, v_{j,p-1}^{n+1}, u_j^{n+1}$ при решении системы уравнений (11) на каждом шаге по продольной координате.

Следует отметить, что по существу коэффициенты свертки \mathbf{D}^m в НГУ (16) зависят только от длины волны и высоты расчетной области. В тоже время они не зависят от параметров среды распространения и излучающей антенны. Таким образом, коэффициенты НГУ могут быть подсчитаны заранее для использования в системах, требующих высокую скорость вычислений.

6. Результаты численного моделирования. Сначала будет рассмотрен случай однородной тропосферы при $N(x, z) \equiv 0$, так как на этом примере проще всего оценить эффективность НГУ. Хорошо известно [12], что в загоризонтной области при отсутствии волноводных эффектов функция $\psi(x, z)$ экспоненциально затухает по продольной координате. Эффективный индекс преломления $m^2(x, z)$ в этом случае представляет собой линейно растущую по высоте функцию. Сравнение предложенного метода будет проводиться с двумя широко используемыми подходами: программой PETOOL [18], осуществляющей численное решение задачи методом расщепления Фурье с использованием поглощающего слоя и с методом Кранка — Николсона для стандартного параболического уравнения с использованием дискретного НГУ [14]. На рисунке 1 изображено распределение функции $10 \log |\psi(x, z)|$ на высоте 30 м для следующих параметров антенны и среды: длина волны $\lambda = 0.03$ м, высота антенны

$z_0 = 30$ м, ширина диаграммы направленности $\beta = 30^\circ$, горизонтальная поляризация, нижняя граница соответствует гладкой морской поверхности. Расчетные параметры указаны в таблице 1.

Таблица 1. Расчетные параметры для использованных численных алгоритмов.
Случай однородной тропосферы

Расчетный параметр	PETOOL	Кранк-Николсон с НГУ	Паде-[1/2] с НГУ
Δx , м	30	10	100
Δz , м	0.3	0.03	0.03
Высота расчетной области, м	300	300	300
Время расчета поля, сек	5.43	9.19	1.65
Время расчета коэффициентов НГУ, сек	-	48.2	113.5

Как видно из рисунка 1, поглощающий слой, используемый в программе PЕTOOL, для выбранных параметров позволяет рассчитывать поле на расстояниях до 60 км и обеспечивает точное решение в динамическом диапазоне 60 дБ. Метод Кранка-Николсона для стандартного параболического уравнения с дискретными НГУ позволил рассчитать поле на 95 км и обеспечил точность в 90 дБ. Предложенный метод показал себя наиболее эффективно, позволив рассчитать поле в однородной тропосфере с точностью 120 дБ при наименьших временных затратах. Отметим, что все вычисления проводились в стандартной арифметике двойной точности (16 десятичных цифр).

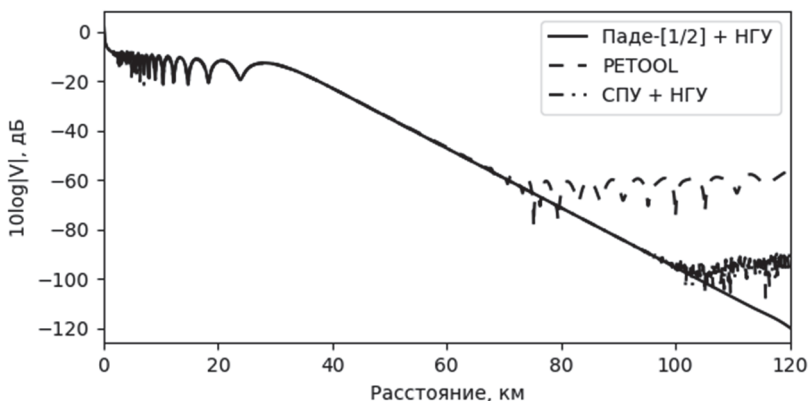


Рис. 1. Распределение функции $10 \log |V|$ на высоте 30 м

Далее рассмотрен пример с наличием горизонтального препятствия, схематично изображенный на рисунке 2. Методы учета гори-

зонтальных препятствий в однонаправленном приближении изложены, например, в [12]. На границах препятствия и подстилающей поверхности искомая компонента электромагнитного поля удовлетворяет условиям Дирихле. Препятствие расположено на расстоянии $L = 500$ м от источника, высота $H = 100$ м, толщина $h = 50$ м. Были использованы следующие параметры антенны: $\lambda = 1$ м, $z_0 = 50$ м, $\beta = 30^\circ$. Индекс преломления тропосферы аналогичен предыдущему примеру. Расчетные параметры указаны в таблице 2.

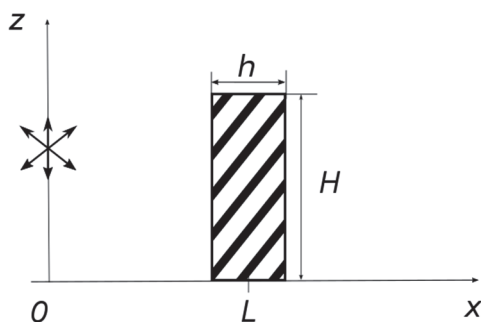


Рис. 2. Рассеяние на препятствии

Таблица 2. Расчетные параметры для использованных численных алгоритмов. Случай однородной тропосферы

Расчетный параметр	PETOOL	Кранк-Николсон с НГУ	Паде-[3/4] с НГУ
Δx , м	1	0.5	1
Δz , м	0.2	0.1	0.1
Высота расчетной области, м	300	300	300
Время расчета поля, сек	5.18	0.73	0.94
Время расчета коэффициентов НГУ, сек	-	5.5	3.37

На рисунке 3 показано распределение поля за препятствием на высоте 10 м. Хорошо видно, что решение, полученное методом Кранк — Николсона, достаточно зашумленное. Это вызвано тем, что при рассеянии на препятствии возникают высокочастотные быстро затухающие осцилляции и связанные с ними ошибки округления, которые метод Кранка — Николсона отфильтровать не способен. Кроме того, хорошо виден провал на промежутке 550-690 м, вызванный ограничением сеточного метода на максимальный угол распространения, преодолеть которое можно лишь очень маленьким шагом сетки. Решения, полученные предложенным методом и методом расщепления Фурье до-

статочны гладкие, что объясняется их регуляризирующими свойствами. Следует также отметить, что решение методом Кранка-Николсон получено для стандартного параболического уравнения Леонтовича-Фока, в то время как РЕТООЛ и Паде схема используют различные варианты широкоугольного параболического приближения. Этим объясняются определенные различия в интерференционной картине.

Описанный метод реализован в виде программной библиотеки на языке Python 3 и свободно доступен по адресу [34].

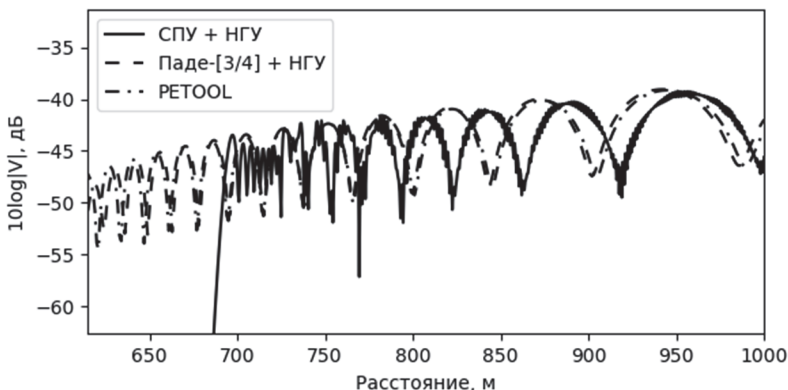


Рис. 3. Распределение функции $10 \log |V|$ на высоте 10 м

7. Заключение. Построены дискретные нелокальные граничные условия для дробно рациональных аппроксимаций однонаправленного уравнения Гельмгольца. Полученные условия учитывают линейно растущий коэффициент преломления за пределами расчетной области. Предлагаемый подход позволяет решать задачу распространения электромагнитных волн вблизи земной поверхности без введения искусственного поглощающего слоя и прочих эмпирических приемов. Построенный алгоритм численного решения не требует ручного подбора расчетных параметров в зависимости от входных данных. Показано, что метод рациональных аппроксимаций можно эффективно применять в задаче расчета характеристик распространения СВЧ радиоволн на дальние расстояния в широком динамическом диапазоне. Аппроксимации Паде позволяют использовать достаточно большой шаг сетки по продольной координате, что делает его более предпочтительным по сравнению с другими алгоритмами. Проведенные эксперименты показывают, что производительность предложенного алгоритма выше, чем метода расщепления Фурье. Также продемонстрирована работа алгоритма в горизонтально неоднородной среде.

Перспективным направлением дальнейших исследований является применение разработанного метода к расчету электромагнитного поля в трехмерно неоднородной среде и учет обратного рассеяния по аналогии с работами [35, 36]. Кроме того, введение нелокальных условий на нижней границе расчетной области может применяться для эффективного вычисления поля над взволнованной морской поверхностью.

Литература

1. *Романов А.В. и др.* Обобщенное описание и классификация моделей эколого-технологических объектов наземно-космического мониторинга // Труды СПИИРАН. 2013. Вып. 5(28). С. 122–142.
2. *Zavorotny V.U., Gleason S., Cardellach E., Camps A.* Tutorial on remote sensing using GNSS bistatic radar of opportunity // IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine. 2014. vol. 2. no. 4. pp. 8–45.
3. *Михайлов М.И., Музалевский К.В., Миронов В.Л.* Измерение толщины льда на пресноводном пруде и реке с использованием сигналов ГЛОНАСС и GPS // Современные проблемы ДЗЗ из космоса. 2017. Т. 14. № 2. С. 167–174.
4. *Wang H. et al.* Modeling signal amplitude of ground-based GPS occultation in marine tropospheric ducts // Journal of Electromagnetic Waves and Applications. 2014. vol. 28. no. 11. pp. 1293–1304.
5. *Dinc E., Akan O.B.* Beyond-line-of-sight communications with ducting layer // IEEE Commun. Mag. 2014. vol. 52. no. 10. pp. 37–43.
6. *Dabrowski T., Barott W.C., Himed B.* Effect of propagation model fidelity on passive radar performance predictions // Proceedings of IEEE Radar Conference (Radar-Con'2015). 2015. pp. 1503–1508.
7. *Светличный В.А., Смирнова О.В.* Применение геоинформационных систем для оперативного прогнозирования радиолокационной наблюдаемости объектов // Информация и космос. 2014. Т. 4. № 4. С. 73–76.
8. *Fountoulakis V., Earls C.* Duct heights inferred from radar sea clutter using proper orthogonal bases // Radio Science. 2016. vol. 51. no. 10. pp. 1614–1626.
9. *Zhang Q., Yang K., Shi Y.* Spatial and temporal variability of the evaporation duct in the Gulf of Aden // Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography. 2016. vol. 68. Issue 1. pp. Article no. 29792.
10. *Zhang R. et al.* Measurement and modeling of angular spreads of three-dimensional urban street radio channels // IEEE Trans. Veh. Technol. 2017. vol. 66. no. 5. pp. 3555–3570.
11. *Brookner E., Cornely P.-R., Lok Y.F.* AREPS and TEMPER: getting familiar with these powerful propagation software tools // Proceedings of IEEE Radar Conference (RadarCon'2007). 2007. pp. 1034–1043.
12. *Levy M.F.* Parabolic Equation Methods for Electromagnetic Wave Propagation // London: IEEE. 2000. 349 p.
13. *Zhang P., Bai L., Wu Z., Guo L.* Applying the Parabolic Equation to Tropospheric Groundwave Propagation: A review of recent achievements and significant milestones // IEEE Antennas Propag. Mag. 2016. vol. 58. no. 3. pp. 31–44.
14. *Акулиничев Ю.П., Захаров Ф.Н., Пермяков В.А., Михайлов М.С.* Состояние и перспективы развития методов численного решения параболического уравнения // Известия высших учебных заведений. Физика. 2016. Т. 59. № 12-3. С. 169–177.
15. *Vavilov S.A., Lytaev M.S.* Calibration and Verification of Models Defining Radar-Visibility Zones in Marine Geoinformation Systems // Proceedings of the 8th international Symposium on Information Fusion and Intelligent Geographic Information Systems (IF&IGIS'17). 2018. pp. 115–125.

16. *Levy M.F.* Transparent boundary conditions for parabolic equation solutions of radio-wave propagation problems // IEEE Trans. Antennas Propag. 1997. vol. 45. no. 1. pp. 66–72.
17. *Ehrhardt M., Mickens R.E.* Solutions to the discrete Airy equation: Application to parabolic equation calculations // J. Comput. Appl. Math. 2004. vol. 172. no. 1. pp. 183–206.
18. *Apaydin G., Sevgi L.* Radio Wave Propagation and Parabolic Equation Modeling // New Jersey: John Wiley & Sons. 2017. 152 p.
19. *Ehrhardt M.* Discrete transparent boundary conditions for Schrodinger-type equations for non-compactly supported initial data // Appl. Numer. Math. 2008. vol. 58. no. 5. pp. 660–673.
20. *Feshchenko R.M., Popov A.V.* Exact transparent boundary conditions for the parabolic wave equations with linear and quadratic potentials // Wave Motion. 2017. vol. 68. pp. 202–209.
21. *Schmidt F., Friese T., Yevick D.* Transparent boundary conditions for split-step Pade approximations of the one-way Helmholtz equation // J. Comput. Phys. 2001. vol. 170. no. 2. pp. 696–719.
22. *Mikhlin D.* Exact discrete nonlocal boundary conditions for high-order Pade parabolic equations // J. Acoust. Soc. Am. 2004. vol. 116. no. 5. pp. 2864–2875.
23. *Ehrhardt M., Zisowsky A.* Discrete non-local boundary conditions for split-step Pade approximations of the one-way Helmholtz equation // J. Comput. Appl. Math. 2007. vol. 200. no. 2. pp. 471–490.
24. *Леонтович М.А., Фок В.А.* Решение задачи о распространении электромагнитных волн вдоль поверхности Земли по методу параболического уравнения // Журн. эксперим. и теор. физики. 1946. Т. 16. С. 557–573.
25. *Бейкер Дж., Грейвс-Моррис П.* Аппроксимации Паде // М.: Мир. 1986. 502 с.
26. *Bamberger A., Engquist B., Halpern L., Joly P.* Higher order paraxial wave equation approximations in heterogeneous media // SIAM J. Appl. Math. 1988. vol. 48. no. 1. pp. 129–154.
27. *Fishman L., Gautesen A.K., Sun Z.* Uniform high-frequency approximations of the square root Helmholtz operator symbol // Wave Motion. 1997. vol. 26. no. 2. pp. 127–161.
28. *Collins M.D.* A split-step Pade solution for the parabolic equation method // The Journal of the Acoustical Society of America. 1993. vol. 93. no. 4. pp. 1736–1742.
29. *Butcher J.C.* Numerical methods for ordinary differential equations // John Wiley & Sons. 2016. 479 p.
30. *Вавилов С. А., Лытаев М. С.* Особенности применения нелокальных граничных условий в задаче тропосферного распространения радиоволн // Труды учебных заведений связи. 2017. Т. 3. № 1. С. 13–20.
31. *Golub G.H., Van Loan C.F.* Matrix computations // Baltimore: JHU Press. 2012. 784 p.
32. *Lentz W.J.* Generating Bessel functions in Mie scattering calculations using continued fractions // Applied Optics. 1976. vol. 15. no. 3. pp. 668–671.
33. *Majidian H.* Filon–Clenshaw–Curtis formulas for highly oscillatory integrals in the presence of stationary points // Appl. Numer. Math. 2017. vol. 117. pp. 87–102.
34. *Wave-propagation.* URL: <https://github.com/mikelytaev/wave-propagation> (дата обращения: 19.12.2017).
35. *Mills M.J., Collins M.D., Lingeitch J.F.* Two-way parabolic equation techniques for diffraction and scattering problems // Wave Motion. 2000. vol. 31. no. 2. pp. 73–180.
36. *Ahdab Z., Akleman F.* Radiowave propagation analysis with a bidirectional 3-D vector parabolic equation method // IEEE Trans. Antennas Propag. 2017. vol. 65. no. 4. pp. 1958–1966.

Лытаев Михаил Сергеевич — аспирант кафедры сетей связи и передачи данных, Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича (СПбГУТ). Область научных интересов: численные методы, математическая физика. Число научных публикаций — 7. mikelytaev@gmail.com; *Большеви-ков 22, корп.1, ауд. 506, Санкт-Петербург, 193232; п.т.: +79213391600.*

M.S. LYTAEV

A NUMERICAL METHOD FOR ESTIMATING TROPOSPHERIC RADIO WAVE PROPAGATION FOR REMOTE MONITORING GEOINFORMATION SYSTEMS

Lytaev M.S. A Numerical Method for Estimating Tropospheric Radio Wave Propagation for Remote Monitoring Geoinformation Systems.

Abstract. Present research deals with the numerical methods for the electromagnetic wave propagation around the Earth. The non-local boundary conditions for finite-difference Pade approximation of the one-way Helmholtz equation are obtained. A linear dependence of the refractive index on the height outside the computational domain can be taken into account. Thus, the proposed method is suitable for tropospheric radio wave propagation problems. The proposed approach gives an opportunity to solve the original problem without introducing artificial absorbing layer in the vicinity of the upper boundary. Pade approximants allows one to carry out the calculations with a rather large step along the longitudinal coordinate, which has a positive effect on performance. The method does not impose any significant limitations on the maximum propagation angle and can be used for two-dimensional scattering problems. Comparison with the results obtained by the split-step Fourier method and Crank-Nikolson scheme is given.

Keywords: non-local boundary condition, radio wave propagation, Helmholtz equation, Pade approximations, parabolic equation

Lytaev Mikhail Sergeevich — Ph.D. student of communications networks department, The Bonch-Bruевич Saint - Petersburg State University of Telecommunications (SPbSUT). Research interests: numerical methods for wave propagation problems. The number of publications — 7. mikelytaev@gmail.com; 22, Bol'shevikov, building 1, room 506, St-Petersburg, 193232, Russia; office phone: +79213391600.

References

1. Romanovs A.V. et al. [General description and classification of the models of ecological and technological objects ground-space monitoring]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*. 2013. vol. 28. pp. 122–142. (In Russ.)
2. Zavorotny V.U., Gleason S., Cardellach E., Camps A. Tutorial on remote sensing using GNSS bistatic radar of opportunity. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*. 2014. vol. 2. no. 4. pp. 8–45.
3. Mikhailov M.I., Muzalevskiy K.V., Mironov V.L. [Ice thickness measurements at freshwater lake and river using GLONASS and GPS signals]. *Sovremennye problemy DZZ iz kosmosa – Current problems in remote sensing of the earth from space*. 2017. vol. 14. no. 2. pp. 167–174. (In Russ.)
4. Wang H. et al. Modeling signal amplitude of ground-based GPS occultation in marine tropospheric ducts. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*. 2014. vol. 28. no. 11. pp. 1293–1304.
5. Dinc E., Akan O.B. Beyond-line-of-sight communications with ducting layer. *IEEE Commun. Mag.* 2014. vol. 52. no. 10. pp. 37–43.
6. Dabrowski T., Barott W.C., Himed B. Effect of propagation model fidelity on passive radar performance predictions. Proceedings of IEEE Radar Conference (Radar-Con'2015). 2015. pp. 1503–1508.
7. Svetlichny V., Smirnova O. [Geoinformation systems for the operational prediction of radar observability for marine objects]. *Informacija i kosmos – Information and space*. 2014. vol. 4. pp. 73–76. (In Russ.)

8. Fountoulakis V., Earls C. Duct heights inferred from radar sea clutter using proper orthogonal bases. *Radio Science*. 2016. vol. 51. no. 10. pp. 1614–1626.
9. Zhang Q., Yang K., Shi Y. Spatial and temporal variability of the evaporation duct in the Gulf of Aden. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*. 2016. vol. 68. Issue 1. pp. Article no. 29792.
10. Zhang R. et al. Measurement and modeling of angular spreads of three-dimensional urban street radio channels. *IEEE Trans. Veh. Technol.* 2017. vol. 66. no. 5. pp. 3555–3570.
11. Brookner E., Cornely P.-R., Lok Y.F. AREPS and TEMPER: getting familiar with these powerful propagation software tools. Proceedings of IEEE Radar Conference (RadarCon'2007). 2007. pp. 1034–1043.
12. Levy M.F. Parabolic Equation Methods for Electromagnetic Wave Propagation. London: IEE. 2000. 349 p.
13. Zhang P., Bai L., Wu Z., Guo L. Applying the Parabolic Equation to Tropospheric Groundwave Propagation: A review of recent achievements and significant milestones. *IEEE Antennas Propag. Mag.* 2016. vol. 58. no. 3. pp. 31–44.
14. Akulinichev Y.P., Zakharov F.N., Permyakov V.A., Mikhailov M.S. [State of the art methods for numerical solution of the parabolic equation]. *Izvestia vuzov. Fizika – Proceedings of the higher educational institutions: Physics*. 2016. vol. 59. no. 12-3. pp. 169–177. (In Russ.).
15. Vavilov S.A., Lytaev M.S. Calibration and Verification of Models Defining Radar-Visibility Zones in Marine Geoinformation Systems. Proceedings of the 8th international Symposium on Information Fusion and Intelligent Geographic Information Systems (IF&IGIS'17). 2018. pp. 115–125.
16. Levy M.F. Transparent boundary conditions for parabolic equation solutions of radiowave propagation problems. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 1997. vol. 45. no. 1. pp. 66–72.
17. Ehrhardt M., Mickens R.E. Solutions to the discrete Airy equation: Application to parabolic equation calculations. *J. Comput. Appl. Math.* 2004. vol. 172. no. 1. pp. 183–206.
18. Apaydin G., Sevgi L. Radio Wave Propagation and Parabolic Equation Modeling. New Jersey: John Wiley & Sons. 2017.
19. Ehrhardt M. Discrete transparent boundary conditions for Schrodinger-type equations for non-compactly supported initial data. *Appl. Numer. Math.* 2008. vol. 58. no. 5. pp. 660–673.
20. Feshchenko R.M., Popov A.V. Exact transparent boundary conditions for the parabolic wave equations with linear and quadratic potentials. *Wave Motion*. 2017. vol. 68. pp. 202–209.
21. Schmidt F., Friese T., Yevick D. Transparent boundary conditions for split-step Pade approximations of the one-way Helmholtz equation. *J. Comput. Phys.* 2001. vol. 170. no. 2. pp. 696–719.
22. Mikhin D. Exact discrete nonlocal boundary conditions for high-order Pade parabolic equations. *J. Acoust. Soc. Am.* 2004. vol. 116. no. 5. pp. 2864–2875.
23. Ehrhardt M., Zisowsky A. Discrete non-local boundary conditions for split-step Pade approximations of the one-way Helmholtz equation. *J. Comput. Appl. Math.* 2007. vol. 200. no. 2. pp. 471–490.
24. Leontovich M.A., Fock V.A. Solution of propagation of electromagnetic waves along the Earth's surface by the method of parabolic equations. *Zhurnal Jekspiermental'noj i Teoreticheskoy Fiziki – Journal of Experimental and Theoretical Physics*. 1946. Issue 16. pp. 13–23.
25. Baker J., Graves-Morris P. *Pade approximations*. Addison-Wesley. 1981 (Russ. ed.: Bejker Dzh., Grejvs-Morris P. *Approksimacii Pade*. M.: Mir. 1986. 502 p).
26. Bamberger A., Engquist B., Halpern L., Joly P. Higher order paraxial wave equation approximations in heterogeneous media. *SIAM J. Appl. Math.* 1988. vol. 48. no. 1. pp. 129–154.

27. Fishman L., Gautesen A.K., Sun Z. Uniform high-frequency approximations of the square root Helmholtz operator symbol. *Wave Motion*. 1997. vol. 26. no. 2. pp. 127–161.
28. Collins M.D. A split-step Pade solution for the parabolic equation method. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1993. vol. 93. no. 4. pp. 1736–1742.
29. Butcher J.C. Numerical methods for ordinary differential equations. John Wiley & Sons. 2016. 479 p.
30. Vavilov S.A., Lytaev M.S. [On application of non-local boundary conditions for tropospheric radio wave propagation problems]. *Trudy uchebnyh zavedenij svjazi – Proceedings of educational institutes of communication*. 2017. vol. 3. no. 1. pp. 13–20.
31. Golub G.H., Van Loan C.F. Matrix computations. Baltimore: JHU Press. 2012. 784 p.
32. Lentz W.J. Generating Bessel functions in Mie scattering calculations using continued fractions. *Applied Optics*. 1976. vol. 15. no. 3. pp. 668–671.
33. Majidian H. Filon–Clenshaw–Curtis formulas for highly oscillatory integrals in the presence of stationary points. *Appl. Numer. Math.* 2017. vol. 117. pp. 87–102.
34. Wave-propagation. Available at: <https://github.com/mikelytaev/wave-propagation>. (accessed: 10.01.2018).
35. Mills M.J., Collins M.D., Lingeitch J.F. Two-way parabolic equation techniques for diffraction and scattering problems. *Wave Motion*. 2000. vol. 31. no. 2. pp. 173–180.
36. Ahdab Z., Akleman F. Radiowave propagation analysis with a bidirectional 3-D vector parabolic equation method. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2017. vol. 65. no. 4. pp. 1958–1966.

О.И. Смоктий
**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛЕЙ ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛОСКОГО
АНИЗОТРОПНО РАССЕИВАЮЩЕГО ОДНОРОДНОГО
СЛОЯ ПРОИЗВОЛЬНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ТОЛЩИНЫ**

Смоктий О.И. **Моделирование полей излучения плоского анизотропно рассеивающего однородного слоя произвольной оптической толщины.**

Аннотация. Проведено моделирование полей излучения плоского однородного слоя произвольной оптической толщины при сильно вытянутых индикатрисах рассеяния. Для реализации этой задачи использовалась модификация классического принципа инвариантности Амбарцумяна — Чандрасекара, позволившая получить новые нелинейные интегральные уравнения для азимутальных Фурье-гармоник обобщенной единой фотометрической функции излучения и фотометрических инвариантов, которые объединяют интенсивности восходящего и нисходящего излучения на произвольных зеркально-симметричных оптических уровнях в зеркальных направлениях визирования при фиксированных азимутах и зенитных расстояниях Солнца. Параметризация полученных нелинейных интегральных уравнений показала, что при отсутствии отражающей подстилающей поверхности на уровне нижней границы слоя пространственно-угловые свойства фотометрических инвариантов и единой фотометрической функции в случае сильно вытянутых индикатрис рассеяния с максимальными значениями вблизи малых углов рассеяния при малом истинном поглощении излучения в среде позволяют приближенно представить общее поле излучения в виде интенсивностей однократно рассеянного излучения с адаптивными поправочными множителями. Эти функциональные поправки обусловлены многократным рассеянием излучения и имеют четкое физическое обоснование. Использование принципа зеркального отображения (симметрии) позволило учесть указанные особенности реальных индикатрис рассеяния при численном моделировании фотометрических инвариантов и единой фотометрической функции. Проведенный анализ показал доминирующую роль однократного рассеяния при формировании полей излучения анизотропно рассеивающего однородного слоя в случае слабого поглощения излучения при сильно вытянутых индикатрисах рассеяния.

Ключевые слова: однородный плоский слой, принцип инвариантности Амбарцумяна — Чандрасекара, нелинейные интегральные уравнения, адаптивная параметризация, фотометрические инварианты, единая фотометрическая функция, коэффициенты яркости, интенсивности поля излучения, однократное рассеяние, поправочные функции, индикатриса Хенъи — Гринштейна.

1. Введение. Проблема численно-аналитического моделирования полей излучения анизотропно рассеивающих и поглощающих природных сред, ограниченных снизу произвольными неортоготно отражающими подстилающими поверхностями, имеет большое теоретическое и прикладное значение [1-7]. Теоретическое значение указанной проблемы обусловлено необходимостью получения высокоточных приближенных решений краевых задач теории переноса излучения в случае реальных индикатрис рассеяния с максимумом вблизи малых углов рассеяния $\gamma \sim 0^\circ$, которые вызывают большие осцилляции указанных решений, потерю их

устойчивости и значительные погрешности в процессе имитационного радиационного моделирования [8-13]. Ее большое прикладное значение определяется важностью решения целого комплекса прямых и обратных задач, связанных с проблемами атмосферной коррекции многоспектральной спутниковой информации и оптики природных экологических систем, в первую очередь, аэрозольно-облачных атмосфер и водных сред, характеризующихся сильным анизотропным рассеянием излучения и одновременно слабым поглощением в них в видимой области спектра $\lambda = 400 - 850$ нм [14-20]. В этой связи актуально получение таких приближенных параметризованных численно-аналитических решений указанной проблемы, которые обладали бы, с одной стороны, достаточно высокой степенью точности, а с другой стороны, были бы простыми по форме своего представления [21-24]. Ниже с этой целью проведено обобщение концепции единой функции $E(\eta, \xi, \varphi, \tau_0)$ выхода излучения из среды на внешних границах $\tau = 0$ и $\tau = \tau_0$ плоского однородного слоя конечной оптической толщины $\tau_0 < \infty$ на случай единой фотометрической функции $I_{\Sigma}(\eta, \xi, \varphi, \tau_0)$ на произвольных оптических глубинах τ внутри среды. Отметим, что первоначально указанная концепция была независимо разработана в [25] и в [26] для коэффициентов яркости $\rho(\eta, \xi, \varphi, \tau_0)$ и $\sigma(\eta, \xi, \varphi, \tau_0)$ плоского однородного слоя на его внешних границах ($\tau = 0$) и ($\tau = \tau_0$) с использованием разных подходов. В [25] использовалась простая модификация классического принципа инвариантности полей излучения Амбарцумяна — Чандрасекара [1-2] в случае симметричного расположения первичных энергетических источников относительно середины однородного плоского слоя. В [26], послужившей основой для последующей разработки общего принципа зеркального отображения (симметрии) полей излучения однородного плоского слоя и соответствующих фотометрических инвариантов [27-28], проведено линейное преобразование классических структурных функций φ_i^m и ψ_i^m Амбарцумяна, определяющих адекватную линейную трансформацию коэффициентов диффузного отражения $\rho(\eta, \xi, \varphi, \tau_0)$ и пропускания $\sigma(\eta, \xi, \varphi, \tau_0)$ излучения однородным слоем на его верхней ($\tau = 0$) и нижней ($\tau = \tau_0$) границах. Оба подхода позволяют с помощью простых линейных операций однозначно определять симметричные по угловым переменным коэффициенты яркостей $\rho(\eta, \xi, \varphi, \tau_0)$ и $\sigma(\eta, \xi, \varphi, \tau_0)$, если

известны значения единой функции выхода $E(\eta, \xi, \varphi, \tau_0)$ при взаимной перестановке $\eta \leftrightarrow \xi$.

Проведенное ниже обобщение нелинейного интегрального уравнения [25] для единой функции выхода $E(\eta, \xi, \varphi, \tau_0)$ на случай произвольных оптических глубин ($0 < \tau < \tau_0$) и последующая параметризация обобщенной единой фотометрической функции $I_\Sigma(\tau, \eta, \xi, \varphi, \tau_0)$ на основе экстремальных свойств сильно вытянутых индикатрис рассеяния $P(\cos \gamma)$ вблизи углов рассеяния $\gamma \sim 0^\circ$ позволяет представить общее поле излучения однородного плоского слоя в виде интенсивностей однократно рассеянного излучения с адаптивными поправочными множителями, обусловленными многократно рассеянным излучением в среде. Отметим, что сконструированные таким образом простые аналитические выражения для интенсивностей восходящего и нисходящего излучения при отсутствии отражающего дна могут в дальнейшем эффективно использоваться при численном моделировании полей излучения системы «атмосфера — подстилающая поверхность» на основе обобщенного принципа инвариантности [29]. Последующая аппроксимация отражательных характеристик неоротропных горизонтально-однородных подстилающих поверхностей с помощью известных полуэмпирических моделей [5–7] позволяет количественно исследовать их влияние на поле излучения, анизотропно рассеянного атмосферой в случае сильно вытянутых индикатрис рассеяния $P(\cos \gamma)$. При этом определение степени пространственно-угловой дискретизации параметров входных оптических моделей и искомым интенсивностей излучения $I(\tau, \eta, \xi, \varphi, \tau_0)$, наряду с их погрешностями в узлах используемых сектор, помогает определить оптимальный уровень информативности радиационного моделирования, при котором возможно эффективное решение прямых и обратных задач теории переноса излучения [13].

2. Параметризация интенсивностей анизотропно рассеянного излучения на произвольных оптических уровнях однородного слоя. Рассмотрим однородный плоский слой конечной оптической толщины $\tau_0 < \infty$, освещенный на уровне его верхней границы ($\tau = 0$) параллельными солнечными лучами, падающими под углом $\theta_0 = \arccos \xi$ относительно внутренней нормали к слою при азимуте Солнца $\varphi_0 = 0$ и создающими монохроматическую освещенность перпендикулярной площадке, равную πS_λ . Индекс длины волны λ при дальнейшем рассмотрении будем опускать. Обозначим также через $\theta = \arccos \eta$ угол между

направлением рассеянного излучения и внутренней нормалью к слою (рисунок 1). Индикатриса атмосферного рассеяния $P(\cos \gamma)$, где γ — угол рассеяния, и альbedo однократного рассеяния Λ предполагаются независимыми от оптической глубины τ .

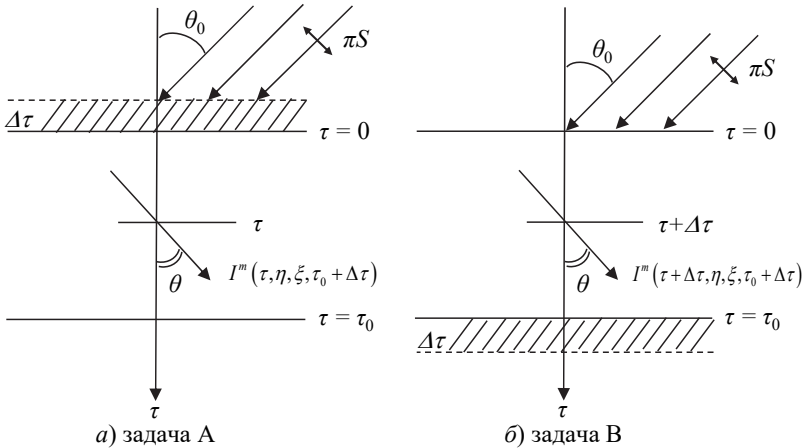


Рис. 1. Применение классического принципа инвариантности Амбарцумяна — Чандрасекара для определения интенсивностей внутренних полей излучения на произвольных оптических уровнях τ

Рассмотрим теперь основную задачу теории переноса излучения, связанную с нахождением интенсивностей излучения $I(\tau, \eta, \xi, \varphi, \tau_0)$ в восходящих ($\eta < 0$) и нисходящих ($\eta > 0$) направлениях визирования на произвольных оптических глубинах $\tau \in [0, \tau_0]$. С целью упрощения последующего численного анализа разложим в ряды Фурье атмосферную индикатрису рассеяния $P(\cos \gamma) = P(\eta, \xi, \varphi)$ и искомую интенсивность излучения $I(\tau, \eta, \xi, \varphi, \tau_0)$ согласно известным представлениям Фурье-анализа:

$$P(\eta, \xi, \varphi) = P^0(\eta, \xi) + 2 \sum_{m=1}^M P^m(\eta, \xi) \cos m\varphi,$$

$$P^m(\eta, \xi) = \sum_{i=m}^M c_i^m \frac{(i-m)!}{(i+m)!} P_i^m(\eta) P_i^m(\xi), \quad c_i^m = x_i \frac{(i-m)!}{(i+m)!}, \quad (1)$$

$$\eta \in [-1, 1], \quad \xi \in [0, 1], \quad \varphi \in [0, 2\pi], \quad \tau \in [0, \tau_0], \quad m = \overline{0, M},$$

$$I(\tau, \eta, \xi, \varphi, \tau_0) = I^0(\tau, \eta, \xi, \tau_0) + 2 \sum_{m=1}^M I^m(\tau, \eta, \xi, \tau_0) \cos m\varphi, \quad (2)$$

$$\eta \in [-1, 1], \quad \xi \in [0, 1], \quad \varphi \in [0, 2\pi], \quad \tau \in [0, \tau_0].$$

где $P_i^m(\eta)$ и $P_i^m(\xi)$ — присоединенные полиномы Лежандра, а x_i — коэффициенты разложения заданной индикатрисы рассеяния $P(\cos \gamma)$ по полиномам Лежандра $P_n(\cos \gamma)$ [3].

Применим далее принцип инвариантности Амбарцумяна — Чандрасекара в его классической интерпретации [1-2] для нахождения азимутальных гармоник интенсивностей $I^m(\tau, \eta, \xi, \tau_0)$, $\eta \in [-1, 1]$, $\xi \in [0, 1]$, $\tau \in [0, \tau_0]$, $m \in \overline{0, M}$. Согласно этому принципу добавление (вычитание) на верхней границе плоского слоя ($\tau = 0$) или вычитание (добавление) на его нижней границе ($\tau = \tau_0$) однородного слоя малой оптической толщины $\Delta\tau \ll 1$ с адекватными основному слою оптическими параметрами не изменяет искомую величину $I^m(\tau, \eta, \xi, \tau_0)$ на произвольных оптических глубинах $0 < \tau < \tau_0$ внутри слоя (рисунок 1а, б). Таким образом, вследствие однородности нового слоя с оптической толщиной $(\tau_0 + \Delta\tau)$ мы имеем следующее соотношение эквивалентности:

$$I^m(\tau, \eta, \xi, \tau_0 + \Delta\tau) \Big|_A = I^m(\tau + \Delta\tau, \eta, \xi, \tau_0 + \Delta\tau) \Big|_B, \quad m = \overline{0, M}. \quad (3)$$

При этом для того, чтобы условие (3) выполнялось в случае добавления слоя малой оптической толщины $\Delta\tau \ll 1$ к верхней границе $\tau = 0$ исходного слоя (задача А), необходимо заменить в основной краевой задаче теории переноса излучения первоначальное граничное условие $I^m(0, \eta, \xi, \tau_0) = 0$ при $\eta > 0$ на этом уровне на новое граничное условие, учитывающее добавочное излучение, прямо ослабленное и затем рассеянное слоем $\Delta\tau \ll 1$ в направлении оптических глубин $\tau \geq 0$. С учетом данного замечания получаем в задаче А (рисунок 1) следующее интегральное уравнение для определения азимутальных гармоник $I^m(\tau, \eta, \xi, \tau_0 + \Delta\tau)$:

$$\begin{aligned}
I^m(\tau, \eta, \xi, \tau_0 + \Delta\tau)|_A &= I^m(\tau, \eta, \xi, \tau_0) e^{-\frac{\Delta\tau}{\xi}} + \frac{\Lambda \Delta\tau}{4 \eta} P^m(\eta, \xi) e^{-\frac{\tau}{\eta}} \Theta(\eta) + \\
&+ \frac{\Lambda}{2} \Delta\tau \int_0^1 P^m(\eta', \xi) I^m(\tau, \eta, \eta', \tau_0) \frac{d\eta'}{\eta'} + \\
&+ \frac{\Lambda}{2} \xi \frac{\Delta\tau}{\eta} e^{-\frac{\Delta\tau}{\xi}} e^{-\frac{\tau}{\xi}} \Theta(\eta) \int_0^1 P^m(-\eta', \eta) \rho^m(\eta', \xi, \tau_0) d\eta' + \\
&+ q \int_0^1 d\eta' \int_0^1 P^m(-\eta', \eta) \rho^m(\eta', \xi, \tau_0) I^m(\tau, \eta, \eta'', \tau_0) e^{-\frac{\Delta\tau}{\xi}} \frac{d\eta''}{\eta''},
\end{aligned} \tag{4}$$

где параметр $q = \xi \Lambda \Delta\tau$ и $\eta \in [-1, 1]$, $\xi \in [0, 1]$, $\tau \in [0, \tau_0 + \Delta\tau]$, $m = \overline{0, M}$. Функция Хевисайда $\Theta(\eta)$ в (4) определяется известным образом:

$$\Theta(\eta) = \begin{cases} 1, & \eta > 0, \\ 0, & \eta \leq 0. \end{cases} \tag{5}$$

Азимутальные гармоники коэффициентов диффузного отражения $\rho^m(\eta, \xi, \tau_0)$ и пропускания $\sigma^m(\eta, \xi, \tau_0)$ соответственно на уровне верхней ($\tau = 0$) и нижней ($\tau = \tau_0$) границ рассматриваемого слоя определяются согласно стандартным Фурье-преобразованиям коэффициентов яркости $\rho(\eta, \xi, \varphi, \tau_0)$ и $\sigma(\eta, \xi, \varphi, \tau_0)$:

$$\begin{aligned}
\rho(\eta, \xi, \varphi, \tau_0) &= \rho^0(\eta, \xi, \tau_0) + 2 \sum_{m=1}^M \rho^m(\eta, \xi, \tau_0) \cos m\varphi, \\
(\eta, \xi) > 0, \quad \varphi &\in [0, 2\pi], \quad \tau \in [0, \tau_0 + \Delta\tau], \quad m = \overline{0, M},
\end{aligned} \tag{6}$$

$$\begin{aligned}
\sigma(\eta, \xi, \varphi, \tau_0) &= \sigma^0(\eta, \xi, \tau_0) + 2 \sum_{m=1}^M \sigma^m(\eta, \xi, \tau_0) \cos m\varphi, \\
(\eta, \xi) > 0, \quad \varphi &\in [0, 2\pi], \quad m = \overline{0, M}, \quad \tau \in [0, \tau_0 + \Delta\tau].
\end{aligned} \tag{7}$$

Для задачи В, аналогично задаче А, применение классического принципа инвариантности полей излучения Амбарцумяна — Чандрасекара приводит к следующему интегральному уравнению для азимутальных гармоник $I^m(\tau + \Delta\tau, \eta, \xi, \tau_0 + \Delta\tau)$:

$$\begin{aligned}
 I^m(\tau + \Delta\tau, \eta, \xi, \tau_0 + \Delta\tau)|_B &= I^m(\tau + \Delta\tau, \eta, \xi, \tau_0) + \\
 &+ \Delta\Lambda \tau \xi \int_0^1 d\eta' \int_0^1 P^m(\eta', -\eta'') \sigma^m(\eta', \xi, \tau_0) I^m(\tau_0 - \tau - \Lambda\tau, -\eta, \eta'', \tau_0) \frac{d\eta''}{\eta''} - \\
 &- \frac{\Lambda}{2} \xi \frac{\Delta\tau}{\eta} e^{-\frac{\tau_0 - \tau - \Delta\tau}{\eta}} \Theta(-\eta) \int_0^1 P^m(\eta', \eta) \sigma^m(\eta', \xi, \tau_0) d\eta' + \\
 &+ \frac{\Lambda}{2} \Delta\tau e^{-\tau_0/\xi} \int_0^1 P^m(-\eta', \xi) I^m(\tau_0 - \tau - \Delta\tau, -\eta', \eta', \tau_0) \frac{d\eta'}{\eta'} - \\
 &- \frac{\Lambda}{4} \frac{\Delta\tau}{\eta} e^{-\tau_0/\xi} e^{-\frac{\tau - \tau_0 + \Delta\tau}{\eta}} P^m(\eta, \xi) \Theta(-\eta), \\
 \eta &\in [-1, 1], \quad \xi \in [0, 1], \quad \tau \in [\Delta\tau, \tau_0 + \Delta\tau], \quad m = \overline{0, M}.
 \end{aligned} \tag{8}$$

Затем, учитывая условие $\Delta\tau \ll 1$, представим величину $I^m(\tau + \Delta\tau, \eta, \xi, \tau_0)$ в виде:

$$\begin{aligned}
 I^m(\tau + \Delta\tau, \eta, \xi, \tau_0) &= I^m(\tau, \eta, \xi, \tau_0) + \Delta\tau \frac{\partial I^m(\tau, \eta, \xi, \tau_0)}{\partial \tau} + o[(\Delta\tau)^2], \\
 \eta &\in [-1, 1], \quad \xi \in [0, 1], \quad \tau \in [0, \tau_0 + \Delta\tau], \quad m = \overline{0, M}.
 \end{aligned} \tag{9}$$

Выражение для производной в соотношении (9) находим из исходного уравнения переноса излучения [3]:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial I^m(\tau, \eta, \xi, \tau_0)}{\partial \tau} &= \frac{1}{\eta} [-I^m(\tau, \eta, \xi, \tau_0) + \frac{\Lambda}{2} \int_{-1}^{+1} P^m(\eta, \eta') I^m(\tau, \eta', \xi, \tau_0) d\eta' + \\
 &+ \frac{\Lambda}{4} P^m(\eta, \xi) e^{-\tau/\xi}], \quad \eta \in [-1, 1], \quad \xi \in [0, 1], \quad \tau \in [0, \tau_0], \quad m = \overline{0, M}.
 \end{aligned} \tag{10}$$

Далее, согласно соотношению эквивалентности (3), приравниваем (4) и (8), а затем, используя соотношения (9) и (10), получаем после несложных, но достаточно громоздких преобразований, искомое нелинейное интегральное уравнение для Фурье-гармоник $I^m(\tau, \eta, \xi, \tau_0)$:

$$\begin{aligned}
 (\xi - \eta)I^m(\tau, \eta, \xi, \tau_0) &= \frac{\Lambda}{2} \xi \int_{-1}^{+1} P^m(\eta, \eta') I^m(\tau, \eta', \xi, \tau_0) d\eta' - \\
 &- \frac{\Lambda}{2} \eta \xi \int_0^1 P^m(\eta', \xi) I^m(\tau, \eta', \tau_0) \frac{d\eta'}{\eta'} - \\
 &- \Lambda \eta \xi^2 \int_0^1 d\eta' \int_0^1 \rho^m(\eta', \xi, \tau_0) P^m(-\eta', \eta'') I^m(\tau, \eta, \eta'', \tau_0) \frac{d\eta''}{\eta''} + \\
 &+ \frac{\Lambda}{2} \eta \xi \int_0^1 P^m(-\eta', \xi) I^m(\tau_0 - \tau, -\eta, \eta', \tau_0) e^{-\tau/\xi} \frac{d\eta'}{\eta'} + \\
 &+ \Lambda \eta \xi^2 \int_0^1 d\eta' \int_0^1 \sigma^m(\eta', \xi, \tau_0) P^m(-\eta', \eta'') I^m(\tau_0 - \tau, -\eta, \eta'', \tau_0) \frac{d\eta''}{\eta''} + \\
 &+ f^m(\tau, \eta, \xi, \tau_0), \quad \eta \in [-1, 1], \quad \xi \in [0, 1], \quad \tau \in [0, \tau_0], \quad m = \overline{0, M},
 \end{aligned} \tag{11}$$

где функции $f^m(\tau, \eta, \xi, \tau_0)$ определяются следующим образом:

$$\begin{aligned}
 f^m(\tau, \eta, \xi, \tau_0) &= \frac{\Lambda}{4} \xi P^m(\eta, \xi) e^{-\tau/\xi} - \frac{\Lambda}{4} \xi P^m(\eta, \xi) e^{-\tau_0/\xi} e^{\tau_0 - \tau/\eta} \Theta(-\eta) - \\
 &- \frac{\Lambda}{4} \xi P^m(\eta, \xi) e^{-\tau/\eta} \Theta(\eta) - \frac{\Lambda}{2} \xi^2 e^{\tau_0 - \tau/\eta} \Theta(-\eta) \int_0^1 P^m(\eta', \xi, \tau_0) P^m(\eta', \eta) d\eta' - \\
 &- \frac{\Lambda}{2} \xi^2 e^{-\tau/\eta} \Theta(\eta) \int_0^1 \rho^m(\eta', \xi, \tau_0) P^m(-\eta', \eta) d\eta'.
 \end{aligned} \tag{12}$$

Таким образом, если азимутальные гармоники коэффициентов яркости $\rho^m(\eta, \xi, \tau_0)$ и $\sigma^m(\eta, \xi, \tau_0)$ заранее известны, тогда нелинейное интегральное уравнение (11)–(12) превращается в систему двух линейных интегральных уравнений Фредгольма II рода относительно двух неизвестных величин $I^m(\tau, \eta, \xi, \tau_0)$ и $I^m(\tau_0 - \tau, -\eta, \xi, \tau_0)$. Для того, чтобы найти второе уравнение для определения величины $I^m(\tau_0 - \tau, -\eta, \xi, \tau_0)$, необходимо провести преобразование уравнений

(11)–(12) с помощью линейных операций пространственного сдвига τ по оптической глубине $\tau \Rightarrow \tau_0 - \tau$ и вращения линии визирования $\eta \Rightarrow -\eta$. В результате таких преобразований из (11)–(12) следует иско-
мое интегральное уравнение, необходимое для нахождения величины $I^m(\tau_0 - \tau, -\eta, \xi, \tau_0)$:

$$\begin{aligned}
 (\xi + \eta) I^m(\tau_0 - \tau, -\eta, \xi, \tau_0) &= \frac{\Lambda}{2} \xi \int_{-1}^{+1} P^m(\eta, \eta') I^m(\tau_0 - \tau, -\eta, \xi, \tau_0) d\eta' + \\
 &+ \frac{\Lambda}{2} \eta \xi \int_0^1 P^m(\eta', \xi) I^m(\tau_0 - \tau, -\eta, \eta', \tau_0) \frac{d\eta'}{\eta'} + \\
 &+ \Lambda \eta \xi^2 \int_0^1 d\eta' \int_0^1 \rho^m(\eta', \xi, \tau_0) P^m(-\eta', \eta'') I^m(\tau_0 - \tau, -\eta, \eta'', \tau_0) \frac{d\eta''}{\eta''} - \\
 &- \frac{\Lambda}{2} \eta \xi \int_0^1 P^m(-\eta', \xi) I^m(\tau, \eta, \eta', \tau_0) e^{-\tau_0/\xi} \frac{d\eta'}{\eta'} - \\
 &- \Lambda \eta \xi^2 \int_0^1 d\eta' \int_0^1 \sigma^m(\eta', \xi, \tau_0) P^m(-\eta', \eta'') I^m(\tau, \eta, \eta'', \tau_0) \frac{d\eta''}{\eta''} + \\
 &+ f^m(\tau_0 - \tau, -\eta, \xi, \tau_0), \quad \eta \in [-1, 1], \quad \xi \in [0, 1], \quad \tau \in [0, \tau_0], \quad m = \overline{0, M}.
 \end{aligned} \tag{13}$$

Таким образом, если величины $I^m(0, -\eta, \xi, \tau_0) = S\xi\rho^m(\eta, \xi, \tau_0)$, $(\eta, \xi) > 0$ и $I^m(\tau_0, \eta, \xi, \tau_0) = S\xi\sigma^m(\eta, \xi, \tau_0)$, $(\eta, \xi) > 0$ заданы, тогда уравнения (11)–(13) образуют систему двух линейных неоднородных интегральных уравнений для определения неизвестных азимутальных гармоник $I^m(\tau, \eta, \xi, \tau_0)$ и $I^m(\tau_0 - \tau, -\eta, \xi, \tau_0)$ интенсивностей нисходящего ($\eta > 0$) и восходящего ($\eta < 0$) излучения на произвольных оптических глубинах τ однородного слоя.

Заметим также, что из уравнения (13) при $\tau \rightarrow 0$ и $\tau_0 \rightarrow \infty$ в случае выполнения граничных условий $I^m(0, \eta, \xi, \tau_0) = 0$, $(\eta, \xi) > 0$ и $I^m(\tau_0, -\eta, \xi, \tau_0) = 0$, $(\eta, \xi) > 0$ следует классическое нелинейное интегральное уравнение Амбарцумяна [1] для нахождения азимутальных гармоник коэффициентов диффузного пропускания $\rho_\infty^m(\eta, \xi)$ полубесконечного однородного слоя. Далее, если сначала положить в (13) $\tau = 0$, а затем $\tau = \tau_0$ в (11), то при указанных выше граничных условиях полу-

чаем известную систему нелинейных интегральных уравнений Чандраскара [2] для Фурье-гармоник $\rho^m(\eta, \xi, \tau_0)$ и $\sigma^m(\eta, \xi, \tau_0)$. Следовательно, система нелинейных интегральных уравнений (11)–(13) обобщает данную классическую систему на произвольную оптическую глубину τ . Однако следует подчеркнуть, что при выводе интегральных уравнений (11) и (13) граничные условия для восходящего ($\eta < 0$) и нисходящего ($\eta > 0$) излучения, соответственно, на уровнях $\tau = 0$ и $\tau = \tau_0$ не используются. Поэтому данные уравнения следует рассматривать в качестве новых интегральных соотношений для калибровки азимутальных гармоник искомым интенсивностям излучения $I^m(\tau_0 - \tau, -\eta, \xi, \tau_0)$ и $I^m(\tau, \eta, \xi, \tau_0)$, которым должны удовлетворять любые регулярные решения основных краевых задач теории переноса излучения [1-7].

3. Единая фотометрическая функция и фотометрические инварианты симметризованной теории переноса излучения. Складывая уравнения (11) и (13), получаем для фотометрических инвариантов $I_{\pm}^m(\tau, \eta, \xi, \tau_0)$, определяемых в [26-27] согласно соотношениям:

$$I_{\pm}^m(\tau, \eta, \xi, \tau_0) = I^m(\tau_0 - \tau, -\eta, \xi, \tau_0) \pm I^m(\tau, \eta, \xi, \tau_0), \quad (14)$$

$$I_{\pm}^m(\tau, \eta, \xi, \tau_0) = \pm I_{\pm}^m(\tau_0 - \tau, -\eta, \xi, \tau_0), \quad \eta \in [-1, 1], \quad \xi \in [0, 1], \quad \tau \in [0, \tau_0], \quad m = \overline{0, M}, \quad (15)$$

следующее интегральное уравнение, которое полностью эквивалентно уравнениям (11) и (13):

$$\begin{aligned} \xi I_{+}^m(\tau, \eta, \xi, \tau_0) + \eta I_{-}^m(\tau, \eta, \xi, \tau_0) &= \frac{\Lambda}{2} \xi \int_{-1}^{+1} P^m(\eta, \eta') I_{+}^m(\tau, \eta, \xi, \tau_0) d\eta' + \\ &+ \Lambda \eta \xi^2 \int_0^1 d\eta' \int_0^1 R_{+}^m(\eta', \xi, \tau_0) P^m(-\eta', \eta'') I_{-}^m(\tau, \eta, \eta'', \tau_0) \frac{d\eta''}{\eta''} + \\ &+ \frac{\Lambda}{2} \eta \xi \int_0^1 \left[P^m(\eta', \xi) + P^m(-\eta', \xi) e^{-\tau_0/\xi} \right] I_{-}^m(\tau, \eta, \eta'', \tau_0) \frac{d\eta''}{\eta''} + \\ &+ f_{+}^m(\tau, \eta, \xi, \tau_0), \quad \eta \in [-1, 1], \quad \xi \in [0, 1], \quad \tau \in [0, \tau_0], \quad m = \overline{0, M}. \end{aligned} \quad (16)$$

Свободный член $f_+^m(\tau, \eta, \xi, \tau_0)$ в уравнении (16) при $0 < \tau < \tau_0$ равен $f_+^m(\tau, \eta, \xi, \tau_0) = f^m(\tau_0 - \tau, -\eta, \xi, \tau_0) + f^m(\tau, \eta, \xi, \tau_0)$, а на внешних границах слоя $\tau = 0$ и $\tau = \tau_0$ согласно [26-27] фотометрические инварианты $R_{\pm}^m(\eta, \xi, \tau_0)$ определяются следующим образом:

$$R_{\pm}^m(\eta, \xi, \tau_0) = \rho^m(\eta, \xi, \tau_0) \pm \sigma^m(\eta, \xi, \tau_0), \quad (\eta, \xi) > 0, \quad m = \overline{0, M}. \quad (17)$$

Заметим, что вследствие свойств инвариантности (15) при численных решениях уравнения (16) можно использовать только половину заданного интервала для оптической глубины τ , то есть $\tau \in [0, \tau_0/2]$ при $\eta \in [-1, 1]$ или альтернативно $\eta \in [0, 1]$, но для полного интервала $\tau \in [0, \tau_0]$.

Рассмотрим теперь более детально левую часть уравнения (16), состоящую из специфической линейной комбинации фотометрических инвариантов $I_+^m(\tau, \eta, \xi, \tau_0)$ и $I_-^m(\tau, \eta, \xi, \tau_0)$ следующего вида:

$$I_{\Sigma}^m(\tau, \eta, \xi, \tau_0) = \xi I_+^m(\tau, \eta, \xi, \tau_0) + \eta I_-^m(\tau, \eta, \xi, \tau_0), \quad (18)$$

$$I_{\Sigma}^m(\tau, \eta, \xi, \tau_0) = (\eta + \xi) I^m(\tau_0 - \tau, -\eta, \xi, \tau_0) + (\xi - \eta) I^m(\tau, \eta, \xi, \tau_0), \quad (19)$$

$\eta \in [-1, 1], \quad \xi \in [0, \tau_0], \quad \tau \in [0, \tau_0], \quad m = \overline{0, M}.$

Очевидно, что линейные комбинации (18) и (19) образуют в теории переноса скалярного излучения новую асимметричную функцию $I_{\Sigma}^m(\tau, \eta, \xi, \tau_0)$ угловых переменных η и ξ , которую назовем единой фотометрической функцией для интенсивностей восходящего ($\eta < 0$) и нисходящего ($\eta > 0$) излучения на произвольных зеркально-симметричных оптических уровнях $\tau = 0$ и $\tau = \tau_0$ в зеркально-симметричных направлениях визирования η и $-\eta$. Отметим, что в случае одновременной и взаимной трансляции текущих оптических $(\tau, \tau_0 - \tau)$ и угловы $(\eta, -\eta)$ переменных согласно условию $\tau \leftrightarrow \tau_0 - \tau$ и $\eta \leftrightarrow -\eta$ для единой фотометрической функции $I_{\Sigma}^m(\tau, \eta, \xi, \tau_0)$ выполняется следующее базовое свойство ее инвариантности:

$$I_{\Sigma}^m(\tau, \eta, \xi, \tau_0) = I_{\Sigma}^m(\tau_0 - \tau, -\eta, \xi, \tau_0), \quad (20)$$

$\eta \in [-1, 1], \quad \xi \in [0, 1], \quad \tau \in [0, \tau_0], \quad m = \overline{0, M}.$

Таким образом, учитывая соотношения инвариантности (15) и (20), единую фотометрическую функцию $I_{\Sigma}^m(\tau, \eta, \xi, \tau_0)$ и ее составляющие компоненты $I_{\pm}^m(\tau, \eta, \xi, \tau_0)$ можно рассматривать не в полной области $D = \{\eta \in [-1, 1], \xi \in [0, 1], \tau \in [0, \tau_0]\}$ изменения переменных (τ, η, ξ) , как это имеет место в несимметризованных краевых задачах классической теории переноса излучения [3-5], а в более узких альтернативных интервалах $D_1 = \{\eta \in [0, 1], \xi \in [0, 1], \tau \in [0, \tau_0]\}$ или $D_2 = \{\eta \in [-1, 1], \xi \in [0, 1], \tau \in [0, 1/2 \tau_0]\}$. В этом случае, как показано в [30], использование свойств инвариантности (15) и (20), наряду с другими преимуществами симметризованной трактовки краевых задач классической теории переноса, приводит к экономии вычислительных ресурсов ЭВМ по сравнению с традиционными численными методами приблизительно в 2-3 раза.

В дальнейшем, используя область D_1 , рассмотрим обобщение величин $\rho^m(\eta, \xi, \tau_0)$ и $\sigma^m(\eta, \xi, \tau_0)$ на произвольные оптические уровни $0 < \tau < \tau_0$ внутри слоя, введя обобщенные азимутальные гармоники коэффициентов яркостей $R^m(\tau, \eta, \xi, \tau_0)$ и $T^m(\tau, \eta, \xi, \tau_0)$ согласно соотношениям:

$$I^m(\tau, \eta, \xi, \tau_0) = S\xi T^m(\tau, \eta, \xi, \tau_0), \quad (\eta, \xi) > 0, \quad \tau \in (0, \tau_0), \quad m = \overline{0, M}, \quad (21)$$

$$I^m(\tau, -\eta, \xi, \tau_0) = S\xi R^m(\tau, \eta, \xi, \tau_0), \quad (\eta, \xi) > 0, \quad \tau \in (0, \tau_0), \quad m = \overline{0, M}. \quad (22)$$

Отметим, что нелинейное интегральное уравнение (16) и линейные комбинации (18) и (19) являются обобщением частного случая единой фотометрической функции $E^m(\eta, \xi, \tau_0)$, введенной в [1-2] на внешних границах $\tau = 0$ и $\tau = \tau_0$, на произвольные оптические глубины τ однородного слоя, включая его внешние границы, именно:

$$I_{\Sigma}^m(\tau, \eta, \xi, \tau_0) = S\xi E^m(\tau, \eta, \xi, \tau_0), \quad (\eta, \xi) > 0, \quad \tau \in [0, \tau_0], \quad m = \overline{0, M}, \quad (23)$$

$$I_{\Sigma}^m(\tau_0, \eta, \xi, \tau_0) = S\xi E^m(\tau_0, \eta, \xi, \tau_0) = S\xi E^m(\eta, \xi, \tau_0), \quad (24)$$

$$I_{\Sigma}^m(0, \eta, \xi, \tau_0) \equiv 0, \quad (\eta, \xi) > 0, \quad m = \overline{0, M}.$$

Кроме того, важно подчеркнуть, что вспомогательная процедура симметризации внешних энергетических источников относительно середины ($\tau_0/2$) рассматриваемого слоя и использование классического принципа инвариантности Амбарцумяна — Чандрасекара [1-2], примененные в [25] для получения нелинейного интегрального уравнения (16), с математической точки зрения, однозначно приводят к обобщенному виду единой фотометрической функции $I_{\Sigma}^m(\tau, \eta, \xi, \tau_0)$, совпадающему с выражениями (18)–(19) и тем самым исключающему по физическим соображениям проблему ее неединственности.

Таким образом, рассмотренное выше нелокальное свойство пространственно-угловой симметрии протяженных полей многократного рассеянного анизотропного излучения в плоском горизонтально-однородном слое является внутренним фундаментальным свойством этих полей излучения, а само существование обобщенной единой фотометрической функции $I_{\Sigma}^m(\tau, \eta, \xi, \tau_0)$ и ее базовых структурных элементов в виде фотометрических инвариантов $I_{\pm}^m(\tau, \eta, \xi, \tau_0)$ при $0 < \tau < \tau_0$ полностью определяется принципом зеркального отображения (симметрии) [27-28]. При этом упомянутая выше симметризация внешних энергетических источников носит исключительно сугубо эвристический характер и в общем случае служит лишь наглядным примером физического проявления нелокальных свойств пространственно-угловой симметрии интенсивностей внутренних полей излучения на зеркально-симметричных оптических глубинах $\tau = 0$ и $\tau = \tau_0$ в зеркально-симметричных направлениях визирования η и $(-\eta)$. Отметим также, что с математической точки зрения инвариантные свойства новых конструкций симметризованной теории переноса излучения — единых фотометрических функций $I_{\Sigma}^m(\tau, \eta, \xi, \tau_0)$ и фотометрических инвариантов $R_{\pm}^m(\tau, \eta, \xi, \tau_0)$ являются следствием линейных структурных трансформаций исходных краевых задач классической теории переноса излучения [3], связанных с группами их линейных преобразований типа пространственного сдвига по оптической глубине $\tau \Rightarrow \tau_0 - \tau$ и вращения направления визирования $\eta \Rightarrow -\eta$. Указанные группы линейных преобразований азимутальных гармоник интенсивностей восходящего $I^m(\tau, -\eta, \xi, \tau_0)$, $(\eta, \xi) > 0$ и нисходящего $I^m(\tau, \eta, \xi, \tau_0)$, $(\eta, \xi) > 0$ излучения однозначно приводит к обобщенным величинам (21)–(22) для азимутальных гармоник коэффициентов яркостей $R^m(\tau, \eta, \xi, \tau_0)$ и $T^m(\tau, \eta, \xi, \tau_0)$.

Пространственно-угловая структура этих величин определяется обобщенными функциями $\varphi_i^m(\tau, \eta, \xi, \tau_0)$ и $\psi_i^m(\tau, \eta, \xi, \tau_0)$ [13], которые на внешних границах $\tau = 0$ и $\tau = \tau_0$ превращаются в классические функции $\varphi_i^m(\eta, \tau_0)$ и $\psi_i^m(\eta, \tau_0)$ Амбарцумяна — Чандрасекара [1-2].

4. Поле диффузно отраженного и пропущенного излучения в случае сильно вытянутых индикатрис рассеяния. Очевидно, что эффективное использование единых фотометрических функций $I_{\Sigma}^m(\tau, \eta, \xi, \tau_0)$ и адекватных им структурных элементов в виде фотометрических инвариантов $I_{\pm}^m(\tau, \eta, \xi, \tau_0)$ предполагает проведение численного моделирования решений интегральных уравнений (11), (13) или (16) с учетом их свойств пространственно-угловой инвариантности (20) и (15). При этом возникает проблема корректного описания с физической и математической позиций поведения азимутальных гармоник $I^m(\tau, -\eta, \xi, \tau_0)$, $(\eta, \xi) > 0$ восходящего и $I^m(\tau, \eta, \xi, \tau_0)$, $(\eta, \xi) > 0$ нисходящего излучения в случае произвольного анизотропного рассеяния излучения, в том числе для реальных сильно вытянутых индикатрис рассеяния $P(\cos \gamma)$. К сожалению, в общем случае внутренних полей анизотропно рассеянного излучения пространственно-угловые свойства симметрии азимутальных гармоник интенсивностей $I^m(\tau, \pm\eta, \xi, \varphi, \tau_0)$, $(\eta, \xi) > 0$, включая их обобщенные коэффициенты яркости $R(\tau, \eta, \xi, \varphi)$ и $T(\tau, \eta, \xi, \varphi)$ на произвольных оптических глубинах τ плоского однородного слоя ($0 < \tau < \tau_0$), за исключением внешних границ $\tau = 0$ и $\tau = \tau_0$, до сих пор не исследованы. Исключение составляет случай однократно рассеянного излучения, для которого известны строгие аналитические выражения азимутальных гармоник $I_1^m(\tau, \pm\eta, \xi, \tau_0)$, $(\eta, \xi) > 0$, определяемых по известным точным формулам [5]:

$$I_1^m(\tau, \eta, \xi, \tau_0) = \frac{\Lambda S}{4} \xi P^m(\eta, \xi) \frac{e^{-\tau/\xi} - e^{-\tau/\eta}}{\xi - \eta}, \quad (25)$$

$$(\eta, \xi) \in [0, 1], \quad \tau \in [0, \tau_0], \quad m = 0, M,$$

$$I_1^m(\tau, -\eta, \xi, \tau_0) = \frac{\Lambda S}{4} \xi P^m(-\eta, \xi) \frac{1 - e^{-(\tau_0 - \tau)\left(\frac{1}{\eta} + \frac{1}{\xi}\right)}}{\xi + \eta} e^{-\tau/\xi}, \quad (26)$$

$$(\eta, \xi) \in [0, 1], \quad \tau \in [0, \tau_0], \quad m = \overline{0, M}.$$

Хотя соотношения (25)–(26) и не обладают свойствами пространственно-угловой симметрии внутри однородного слоя ($0 < \tau < \tau_0$), они позволяют, как это следует из их структуры, адекватно описать их аналитически. В этой связи актуальна проблема нахождения приближенных численно-аналитических решений нелинейных интегральных уравнений (11), (13) или альтернативно (16) на основе их адаптивных угловых параметризаций в случае реальных индикатрис рассеяния $P(\cos \gamma)$, имеющих резкие максимумы в области малых углов рассеяния $\gamma \sim 0^\circ$.

Отметим, что согласно общей теории многократного анизотропного рассеяния света [3] базовый асимптотический параметр $(1 - \Lambda)/(3 - x_1)$, где x_1 — первый коэффициент разложения заданной сильно вытянутой ($x_1 \sim 3$) индикатрисы рассеяния $P(\cos \gamma)$ по полиномам Лежандра $P_n(\cos \gamma)$ в классическом случае чистого рассеяния $\Lambda \sim 1$ может существенно превышать единицу. Это обстоятельство значительно осложняет применение стандартных методов указанной теории при решении прикладных задач переноса излучения и, соответственно, численном радиационном моделировании в условиях больших потерь точности и неустойчивости известных расчетных схем и алгоритмов [31].

Следует заметить, что с физической точки зрения условие $(1 - \Lambda)/(3 - x_1) \gg 1$ означает, что многократно рассеянные фотоны глубоко проникают в среду, где поглощаются. Вследствие этого их вклад в общее поле излучения, диффузно отраженного и пропущенного слоем на уровне τ , оказывается малым, что может приводить к значительному упрощению его пространственно-угловой структуры. Ниже будет показано, что полное преодоление указанных выше вычислительных трудностей в случае сильно вытянутых индикатрис рассеяния $P(\cos \gamma)$ может быть достигнуто для Фурье-гармоник $I^m(\tau, \pm\eta, \xi, \tau_0)$, $(\eta, \xi) > 0$ с приемлемой точностью на базе использования соотношений (14)–(15), (18)–(20) и адаптивной параметризации исходных нелинейных интегральных уравнений (11)–(13) и (16), учитывающей экстремальные свойства реальных индикатрис рассеяния

$P(\cos \gamma)$ вблизи малых углов $\gamma \sim 0^\circ$. Действительно, реальные сильно вытянутые индикатрисы рассеяния $P(-\eta', \eta'', \varphi' - \varphi'')$ и $P(\eta', \eta'', \varphi' - \varphi'')$ аэрозольно-облачных атмосфер и водных сред для восходящих ($\eta < 0$) и нисходящих ($\eta > 0$) направлений визирования имеют резкие максимумы при $\eta' = \eta'' = 0$, $\varphi' = \varphi''$ и $\eta' = \eta''$, $\varphi' = \varphi''$ соответственно. Используя эти свойства при рассмотрении нелинейных интегральных уравнений (11)–(13) и (16) и вынося из-под знаков интегралов в этих уравнениях неизвестные величины $I^m(\tau_0 - \tau, -\eta, \xi, \tau_0)$ и $I^m(\tau, \eta, \xi, \tau_0)$ в упомянутых точках максимумов функции $P(\cos \gamma) = P(\eta', \eta'', \varphi' - \varphi'')$, будем пренебрегать нелинейными членами в указанных уравнениях. Очевидное обоснование подобного приближения обусловлено тем обстоятельством, что нелинейные члены в уравнениях (11)–(13) и (16) соответствуют фотонам, которые в процессе многократного рассеяния переизлучаются в области малых углов рассеяния из направления «вперед» ($\gamma \sim 0^\circ$) в направление «назад» ($\gamma \sim 90^\circ$). Очевидно, что с физической точки зрения подобный процесс достаточно маловероятен, учитывая наличие резких максимумов у сильно вытянутых индикатрис рассеяния $P(\cos \gamma)$, именно в направлении малых углов рассеяния $\gamma \sim 0^\circ$.

Принимая во внимание сделанные замечания, после достаточно простых, но довольно громоздких и трудоемких процедур подгоночной параметризации интегральных уравнений (11)–(13), получаем приближенные аналитические аппроксимации Фурье-гармоник $I^m(\tau_0 - \tau, -\eta, \xi, \tau_0)$ и $I^m(\tau, \eta, \xi, \tau_0)$, $(\eta, \xi) > 0$, $\tau \in [0, \tau_0]$, $m = \overline{0, M}$ образующих введенную выше единую фотометрическую функцию $I_{\Sigma}^m(\tau, \eta, \xi, \tau_0)$, $\eta \in [-1, 1]$, $\xi \in [0, 1]$, $\tau \in [0, \tau_0]$, $m = \overline{0, M}$:

$$I^m(\tau_0 - \tau, -\eta, \xi, \tau_0) \approx \frac{\Lambda S}{4} \xi P^m(-\eta, \xi) \frac{1 - e^{-\tau \left(\frac{1}{\eta} + \frac{1}{\xi} \right)}}{\xi \left[1 - \frac{\Lambda}{2} a(\eta) \right] + \eta \left[1 - \frac{\Lambda}{2} a(\xi) \right]} e^{-\tau_0 - \tau / \xi}, \quad (27)$$

$$\eta \in [0, 1], \quad \xi \in [0, 1], \quad \tau \in [0, \tau_0], \quad m = \overline{0, M},$$

$$I^m(\tau, \eta, \xi, \tau_0) = \frac{\Lambda S}{4} \xi P^m(\eta, \xi) \frac{e^{-\frac{\tau}{\eta}} - e^{-\frac{\tau}{\xi}}}{\xi \left[1 - \frac{\Lambda}{2} a(\eta) \right] - \eta \left[1 - \frac{\Lambda}{2} a(\xi) \right]}, \quad (28)$$

$$\eta \in [0, 1], \quad \xi \in [0, 1], \quad \tau \in [0, \tau_0], \quad m = \overline{0, M}.$$

Вспомогательная функция адаптивной параметризации $a(\eta)$ в (27)–(28) находится согласно следующей точной формуле [32]:

$$a(\eta) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} d\varphi' \int_0^1 P(\eta', \eta, \varphi') d\eta'. \quad (29)$$

Для применения приближенных соотношений (27)–(28) необходимо выбрать соответствующий алгоритм численного моделирования функции $a(\eta)$ и исследовать ее свойства во всем интервале изменения угловых переменных $\eta \in [-1, 1]$, $\xi \in [0, 1]$, $\varphi \in [0, 2\pi]$ [32]. В этой связи, наряду с определением функции $a(\eta)$ согласно (29), целесообразно использовать ее другое альтернативное определение, при котором интегрирование ведется по новой угловой переменной $\mu = \cos \gamma$ [32]. Для этого вместо старых угловых переменных (η, ξ, φ) вводятся новые аргументы (μ, ξ, ψ) с областью определения: $0 \leq \psi \leq 2\pi$, $1 \geq \mu \geq \sqrt{1 - \xi^2}$ и $c(\mu, \xi) \leq \psi \leq 2\pi - c(\mu, \xi)$, $\sqrt{1 - \xi^2} \geq \mu \geq -\sqrt{1 - \xi^2}$, где функция $c(\mu, \xi)$ определяется следующим образом:

$$c(\mu, \xi) = \arccos \frac{\xi \mu}{\sqrt{(1 - \xi^2)(1 - \mu^2)}}. \quad (30)$$

В результате вместо (29) получаем для определения функции $a(\eta)$ представление, более удобное для проведения интегрирования:

$$a(\eta) = \int_0^1 P(\mu) d\mu - \frac{1}{\pi} \int_0^1 [P(\mu) - P(-\mu)] c(\mu, \xi) d\mu. \quad (31)$$

Отметим, что из (29) при условии нормировки заданной индикатрисы рассеяния $P(\cos \gamma) = P(\eta, \xi, \varphi)$ согласно известному соотношению:

$$\frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} d\varphi \int_{-1}^1 P(\eta, \xi, \varphi) d\eta = 1 \quad (32)$$

находим, что $a(\eta) + a(-\eta) = 2$ и $a(0) = 1$.

Для сильно вытянутых индикатрис рассеяния $P(\cos \gamma)$, как это следует из (29), имеем $a(\eta) > a(-\eta)$ при $\eta > 0$. Отсюда получаем с учетом условия нормировки (32), что значения функции $a(\eta)$ заключены в интервале $0 < a(\eta) < 2$. В случае модельной однопараметрической индикатрисы рассеяния Хеньи — Гринштейна, часто используемой при численном радиационном моделировании:

$$P(\cos \gamma) = (1 - g^2) (1 + g^2 - 2g \cos \gamma)^{-3/2}, \quad |g| < 1, \quad x_1 = 3g, \quad (33)$$

для адаптивной вспомогательной функции $a(\eta)$ получаем явное аналитическое выражение [32]. Действительно, подставляя (33) в (31) и интегрируя затем по частям, находим:

$$a(\eta) = \frac{1+g}{g} - \frac{1-g^2}{g} \cdot \frac{\xi}{\sqrt{1+g^2+2gz}} \left[\frac{1}{1-z} \Pi\left(\frac{\pi}{2}, \frac{2z}{1-z}, k\right) + \frac{1}{1+z} \Pi\left(\frac{\pi}{2}, \frac{2z}{1+z}, k\right) \right], \quad (34)$$

где $k^2 = 4gz / (1 + g^2 + 2gz)$ и $z = \sqrt{1 - \xi^2}$. Входящие в (34) эллиптические интегралы 3-го рода $\Pi\left(\frac{\pi}{2}, \frac{2z}{1 \mp z}, k\right)$ вычисляются с помощью эллиптических интегралов 1-го и 2-го рода [33].

В таблице 1 представлены значения функции $a(\eta)$, рассчитанные по приближенной формуле (34) для сильно вытянутой индикатрисы рассеяния Хеньи — Гринштейна ($g \sim 1$) в зависимости от угла η и параметра g . Данные таблицы 1 показывают, что при увеличении пара-

метра вытянутости $g \rightarrow 1$ ($x_1 \rightarrow 3$) для указанной индикатрисы рассеяния функция $a(\eta)$ при $\eta > 0$ стремится к 2, то есть, как и следовало ожидать, $a(-\eta) \ll 1$.

Таблица 1. Численные значения функции $a(\eta)$

g	η							
	0	0,05	0,10	0,20	0,40	0,60	0,80	1
0,950	1,00	1,560	1,710	1,860	1,930	1,960	1,970	1,980
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,990	1,00	1,878	1,740	1,972	1,987	1,992	1,994	1,996
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,999	1,00	1,987	1,994	1,997	1,998	1,999	1,999	1,999
0	0	9	0	2	7	2	4	6

Отметим, что на основе точных формул (25)–(26) можно трансформировать выражения (27)–(28) в следующие адаптивные аналитические соотношения, учитывающие многократное анизотропное рассеяние в однородном плоском слое конечной оптической толщины $\tau_0 < \infty$ при $\Lambda \sim 1$ и $g \sim 1$:

$$I^m(\tau_0 - \tau, -\eta, \xi, \tau_0) = M(-\eta, \xi) I_1^m(\tau_0 - \tau, -\eta, \xi, \tau_0), \quad (35)$$

$$\eta \in [0, 1], \quad \xi \in [0, 1], \quad \tau \in [0, \tau_0], \quad m = \overline{0, M},$$

$$I^m(\tau, \eta, \xi, \tau_0) = M(\eta, \xi) I_1^m(\tau, \eta, \xi, \tau_0), \quad (36)$$

$$\eta \in [0, 1], \quad \xi \in [0, 1], \quad \tau \in [0, \tau_0], \quad m = \overline{0, M}.$$

Полученные параметризованные соотношения (35)–(36) показывают доминирующее влияние однократного рассеяния при формировании общего поля рассеянного излучения в случае реальных, сильно вытянутых индикатрис рассеяния $P(\cos \gamma)$. При этом адаптивные функции $M(\pm\eta, \xi)$, $(\eta, \xi) > 0$ определяются согласно выражениям:

$$M(-\eta, \xi) = \frac{\eta + \xi}{\xi \left[1 - \frac{\Lambda}{2} a(\eta) \right] + \eta \left[1 - \frac{\Lambda}{2} a(\xi) \right]}, \quad (\eta, \xi) > 0, \quad (37)$$

$$M(\eta, \xi) = \frac{\xi - \eta}{\xi \left[1 - \frac{\Lambda}{2} a(\eta) \right] - \eta \left[1 - \frac{\Lambda}{2} a(\xi) \right]}, \quad (\eta, \xi) > 0. \quad (38)$$

При численном радиационном моделировании они играют роль подгоночных функциональных множителей, корректирующих вклад многократно рассеянных фотонов в общее поле излучения.

Отметим, что приближенные формулы (35)–(38) можно также представить в более компактном виде, а именно:

$$I^m(\tau, \eta, \xi, \tau_0) \approx \frac{\Lambda S}{4} \xi I^m(\eta, \xi) \frac{e^{-\tau/\xi} - e^{-\tau/\eta} \Theta(\eta) - e^{-\tau/\xi} e^{-(\tau_0 - \tau) \left(\frac{1}{\xi} - \frac{1}{\eta} \right)} \Theta(-\eta)}{\xi \left[1 - \frac{\Lambda}{2} a(|\eta|) \right] - \eta \left[1 - \frac{\Lambda}{2} a(\xi) \right]}, \quad (39)$$

$$\eta \in [-1, 1], \quad \xi \in [0, 1], \quad \tau \in [0, \tau_0], \quad m = \overline{0, M}.$$

Аналогично (35)–(36), используя соотношения (39) и (25)–(26), имеем:

$$I^m(\tau, \eta, \xi, \tau_0) = \tilde{M}(\eta, \xi) I_1^m(\tau, \eta, \xi, \tau_0), \quad \eta \in [-1, 1], \quad \xi \in [0, 1], \quad \tau \in [0, \tau_0], \quad m = \overline{0, M}, \quad (40)$$

где адаптивные подгоночные функции $\tilde{M}(\eta, \xi)$ симметричны по угловым переменным (η, ξ) и представляются в следующем виде:

$$\tilde{M}(\eta, \xi) = \frac{\xi - \eta}{\xi \left[1 - \frac{\Lambda}{2} a(|\eta|) \right] - \eta \left[1 - \frac{\Lambda}{2} a(\xi) \right]}, \quad \eta \in [-1, 1], \quad \xi \in [0, 1], \quad \tau \in [0, \tau_0], \quad m = \overline{0, M}. \quad (41)$$

Заметим также, что азимутальные гармоники восходящего и нисходящего излучения $I^m(\tau, \pm\eta, \xi, \tau_0)$, $(\eta, \xi) > 0$ внутри плоского однородного слоя ($0 < \tau < \tau_0$) могут быть описаны с помощью другой альтернативной подгоночной функции, симметричной по переменным (η, ξ) и отличающейся по своей угловой структуре от введенной выше функции $\tilde{M}(\eta, \xi)$. Действительно, вместо (39) представим искомые интенсивности $I^m(\tau, \pm\eta, \xi, \tau_0)$, $(\eta, \xi) > 0$ с помощью другого структурного соотношения:

$$I^m(\tau, \eta, \xi, \tau_0) = S \xi \left[\Theta(\eta) + \Theta(-\eta) e^{-\frac{\tau}{\xi}} - e^{-\frac{\tau}{\xi}} e^{-(\tau_0 - \tau) \left(\frac{1}{\xi} - \frac{1}{\eta} \right)} \Theta(-\eta) \right] j^m(\tau, \eta, \xi, \tau_0), \quad (42)$$

$$\eta \in [-1, 1], \quad \xi \in [0, 1], \quad \tau \in [0, \tau_0], \quad m = \overline{0, M},$$

где новая адаптивная подгоночная функция $j^m(\tau, \eta, \xi, \tau_0)$ в интервалах $\eta \in [-1, 1]$, $\xi \in [0, 1]$ и $\tau \in [0, \tau_0]$ представляется в виде следующего приближенного аналитического выражения:

$$j^m(\tau, \eta, \xi, \tau_0) = \frac{\Lambda}{4} P^m(\eta, \xi) \frac{e^{-\frac{\tau}{\xi}} - e^{-\frac{\tau}{\eta}}}{\xi \left[1 - \frac{\Lambda}{2} a(\eta) \right] - \eta \left[1 - \frac{\Lambda}{2} a(\xi) \right]}, \quad (43)$$

$$(\eta, \xi) > 0, \quad \tau \in [0, \tau_0], \quad m = \overline{0, M},$$

$$j^m(\tau, -\eta, \xi, \tau_0) = \frac{\Lambda}{4} P^m(-\eta, \xi) \frac{1}{\xi \left[1 - \frac{\Lambda}{2} a(\eta) \right] + \eta \left[1 - \frac{\Lambda}{2} a(\xi) \right]}, \quad (44)$$

$$(\eta, \xi) > 0, \quad \tau \in [0, \tau_0], \quad m = \overline{0, M}.$$

Используя угловую симметрию азимутальных гармоник исходной индикатрисы рассеяния $P^m(\eta, \xi) = P^m(\xi, \eta)$, $P^m(-\eta, -\xi) = P^m(\eta, \xi)$, из соотношений (43) и (44) находим:

$$j^m(\tau, \eta, \xi, \tau_0) = j^m(\tau, \xi, \eta, \tau_0), \quad (\eta, \xi) > 0, \quad \tau \in [0, \tau_0], \quad m = \overline{0, M}, \quad (45)$$

$$j^m(\tau, -\eta, \xi, \tau_0) = j^m(\tau, -\xi, \eta, \tau_0), \quad (\eta, \xi) > 0, \quad \tau \in [0, \tau_0], \quad m = \overline{0, M}. \quad (46)$$

Таким образом, для полей излучения в нисходящих ($\eta > 0$) и восходящих ($\eta < 0$) направлениях визуирования альтернативные структурные функции $j^m(\tau, \eta, \xi, \tau_0)$ симметричны по угловым переменным η и ξ . Отметим, что полученные приближенные аналитические выражения (27) и (28) являются базовыми для аналогичных представлений Фурье-гармоник фотометрических инвариантов $I_{\pm}^m(\tau, \eta, \xi, \tau_0)$ и единой фотометрической функции $I_{\Sigma}^m(\tau, \eta, \xi, \tau_0)$, $\eta \in [-1, 1]$, $\xi \in [0, 1]$, $\tau \in [0, \tau_0]$, $m = \overline{0, M}$. Используя определения (14)–(15) и соотношения (35)–(36), получаем для азимутальных гармоник фотометрических инвариантов $I_{\pm}^m(\tau, \eta, \xi, \tau_0)$ в случае сильно вытянутых индикатрис рассеяния $P(\cos \gamma)$ следующие приближенные аналитические представления:

$$I_{\pm}^m(\tau, \eta, \xi, \tau_0) \approx M(-\eta, \xi) I_1^m(\tau_0 - \tau, -\eta, \xi, \tau_0) \pm M(\eta, \xi) I_1^m(\tau, \eta, \xi, \tau_0), \quad (47)$$

$$\eta \in [-1, 1], \quad \xi \in [0, 1], \quad \tau \in [0, \tau_0], \quad m = \overline{0, M}.$$

Аналогичным образом, используя определение (18) и соотношение (47), для Фурье-гармоник единой фотометрической функции $I_{\Sigma}^m(\tau, \eta, \xi, \tau_0)$ находим:

$$I_{\Sigma}^m(\tau, \eta, \xi, \tau_0) = (\xi + \eta)M(-\eta, \xi)I_1^m(\tau_0 - \tau, -\eta, \xi, \tau_0) + (\xi - \eta)M(\eta, \xi)I_1^m(\tau, \eta, \xi, \tau_0), \quad (48)$$

$$\eta \in [-1, 1], \xi \in [0, 1], \tau \in [0, \tau_0], m = \overline{0, M}.$$

Отметим, что структура полученных выше адаптивных параметризованных соотношений позволяет дать четкую физическую интерпретацию трансформации исходных точных интегральных уравнений (11), (13) и (16) в адекватные им приближенные аналитические соотношения (35)–(41) и (47)–(48). Именно подобное преобразование с физической точки зрения имитирует селективное пространственно-угловое «вмораживание» однократно рассеянных фотонов в качестве своеобразного «ядра» в общем поле излучения. Его последующая мультипликативная корректировка с помощью адаптивных подгоночных функций $M(\pm\eta, \xi)$ и $\tilde{M}(\pm\eta, \xi)$ учитывает влияние многократно рассеянных фотонов в случае сильно вытянутых индикатрис рассеяния $P(\cos \gamma)$. При этом, как отмечено выше, максимальные значения базового асимптотического параметра $(1 - \Lambda)/(3 - x_1) \gg 1$, с физической точки зрения, соответствуют глубокому проникновению и поглощению в среде многократно рассеянных фотонов. В результате вклад многократно рассеянных фотонов в общее поле излучения, диффузно отраженного и пропущенного однородным слоем, оказывается незначительным, что и приводит к значительному упрощению его пространственно-угловой структуры и значительному увеличению доли однократно рассеянного излучения.

5. Результаты численного радиационного моделирования. В таблице 2 в случае полубесконечной однородной атмосферы ($\tau_0 = \infty$) проведено сравнение рассчитанных в [32] для индикатрисы рассеяния Хеньи — Гринштейна точных значений нулевой азимутальной гармоники ($m = 0$) коэффициента отражения $\rho_{\infty}^0(\eta, \xi)$ и соответствующих приближенных величин, определенных по формуле (27), в зависимости от значений базовых оптических параметров Λ и $(1 - \Lambda)/(1 - g)$. Из таблицы 2 следует, что в случае сильно вытянутых индикатрис Хеньи — Гринштейн ($g \sim 1$) с ростом параметра $(1 - \Lambda)/(1 - g) \gg 1$ при стремлении $g \rightarrow 1$, приближенные величины $\rho_{\infty}^0(\eta, \xi)$ асимптотически стремятся к своим точным значениям.

Далее отметим, что на основании проведенного выше анализа адаптивная параметризация нелинейного интегрального уравнения (16) при численном моделировании единой фотометрической функции $I_{\Sigma}^m(\tau, \eta, \xi, \tau_0)$ и последующем нахождении составляющих ее фотометрических инвариантов $I_{\pm}^m(\tau, \eta, \xi, \tau_0)$, $\eta \in [-1, 1]$, $\xi \in [0, 1]$, $\tau \in [0, \tau_0]$ непосредственно не использовалась для нахождения величин $I^m(\tau, \pm\eta, \xi, \tau_0)$, $\eta \in [0, 1]$, $\xi \in [0, 1]$, $\tau \in [0, \tau_0]$. В первую очередь это связано с тем, что процедура подобной параметризации полностью адекватна той, которая была выполнена для уравнений (11)–(13) на основе использования экстремальных свойств исходных сильно вытянутых индикатрис рассеяния $P(\cos \gamma)$ и доминирующего влияния однократного рассеяния.

В заключение отметим, что выражения (37)–(41) и (43)–(44) для адаптивных подгоночных функций $M(\pm\eta, \xi)$, $\tilde{M}(\eta, \xi)$ и $j^m(\tau, \eta, \xi, \tau_0)$ можно значительно упростить, если воспользоваться очевидным свойством функции $a(\eta)$, а именно $a(\eta) \approx 2$. Например, в случае (37)–(38) имеем $M(\pm\eta, \xi) \approx 1/(1 - \Lambda)$. Далее, при очень малых значениях угловых переменных $\xi \approx 0$ и $\eta \approx 0$ находим $M(\pm\eta, \xi) \approx 2/(2 - \Lambda)$, что практически позволяет использовать вместо приближенных выражений (35)–(38) точные формулы (25)–(26) для азимутальных гармоник однократно рассеянного излучения.

6. Заключение. Рассмотренный выше адаптивный подход, основанный на параметризации новых нелинейных интегральных уравнений (11)–(13) и (16), позволяет получить простые приближенные аналитические соотношения для интенсивностей восходящего и нисходящего излучения на произвольных зеркально-симметричных уровнях τ и $(\tau_0 - \tau)$ в зеркальных направлениях визирования слабо поглощающего $(1 - \Lambda) \ll 1$ и анизотропно рассеивающего ($x_1 \approx 3$) однородного слоя произвольной оптической толщины $\tau_0 \leq \infty$. Указанные приближенные выражения для Фурье-гармоник интенсивностей излучения $I^m(\tau, \pm\eta, \xi, \tau_0)$, $(\eta, \xi) > 0$ показывают доминирующее влияние однократного рассеяния на формирование общего поля излучения в случае сильно вытянутых индикатрис рассеяния $P(\cos \gamma)$. В рамках заданного уровня дискретности переменных (τ, η, ξ) и точности расчетов ($\sim 10^{-4}$)

азимутальных гармоник интенсивностей излучения $I^m(\tau, \pm\eta, \xi, \tau_0)$, $(\eta, \xi) > 0$ они могут использоваться при численном радиационном моделировании и учете влияния неортогортной горизонтально-однородной подстилающей поверхности на общее поле излучения, а также постановке и решении обратных задач теории переноса излучения в видимой области спектра $\lambda = 400 - 850$ нм.

Литература

1. *Амбарцумян В.А.* Научные труды // Ереван: Изд-во АН Арм. ССР. 1960. т. 1. 429 с.
2. *Chandrasekhar S.* Radiative transfer // Oxford: Oxford Univ. Press. 1950. 394 p.
3. *Соболев В.В.* Рассеяние света в атмосферах планет // М.: Наука, 1972. 335 с.
4. *van de Hulst H.G.* Multiple light scattering: Tables, Formulas and Applications // New York: Academic Press. 1980. 739 p.
5. *Минин И.Н.* Теория переноса излучения в атмосферах планет // М.: Наука. 1988. 264 с.
6. *Bohren C.F., Clothiaux E.E.* Fundamentals of Atmospheric Radiation // Weinheim: Wiley-VCH, Verlag GmbH. 2006. 479 p.
7. *Thomas G.E., Stamnes K.* Radiative Transfer in the Atmosphere and Ocean // Cambridge, New York: Cambridge University Press. 2006. 540 p.
8. *Budak V.P., Klyuykov D.A., Korkin S.V.* Complete matrix solution of radiative transfer equation for pile of horizontally slabs // Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 2011. vol. 117. issue 7. pp. 1141–1148.
9. *Budak V.P., Kaloshin G.A., Shagalov O.V., Zheltov V.S.* Numerical modeling of the radiative transfer in a turbid medium using the synthetic iteration // Optics Express. 2015. vol. 23. no. 15. pp. 829–835.
10. *Будак В.П., Желтов В.С., Лубенченко А.В., Фрейдлин К.С., Шагалов О.В.* Быстрый и точный алгоритм численного моделирования переноса излучения в мутной среде на основе метода синтетических итераций // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29. № 9. С. 739–746.
11. *Budak V.P., Klyuykov D.A., Korkin S.V.* Convergence acceleration of radiative transfer equation solution at strongly anisotropic scattering // Light Scattering Reviews 5: Single Light Scattering and Radiative Transfer. Berlin: Springer Praxis Books. 2010. pp. 147–204.
12. *Ilyushin Ya.A.* The advanced small angle approximation with application to the numerical radiative transfer calculations // Proceedings of International Radiation Symposium (IRS/IAMAS). 2013. pp. 105–109.
13. *Smokty O.I.* Analytical spatial-angular structure of uniform slab radiation fields for strongly elongated phase functions // Proceedings of Computation Sci. and Applications (ICCSA'2016). Part I. pp. 110–128.
14. *Atberger C.* Advances in remote sensing of agriculture: context description, existing operational monitoring systems and major information needs // Remote Sens. 2013. no. 5(2). pp. 949–981.
15. *Hanes T.U.* (Ed.) Biophysical applications of satellite remote sensing // Heidelberg–New York–London, Dordrecht: Springer. 2014. 230 p.
16. *Зега Э.П., Иванов А.П., Кацев И.Л., Прихач А.С.* Восстановление оптических характеристик аэрозольной атмосферы и поверхности Земли путем совместной обработки различной спутниковой информации // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2014. Т. 50. № 2. С. 215–223.
17. *Belov V.V., Tarasenko M.V.* On the accuracy and speed of RTM algorithms for atmospheric correction of satellite images in the visible and UV ranges. // Atmos. and Ocean Opt. 2014. vol. 27. n. 1. pp. 56–61.

18. *Duanabc S.-B., Licd Z.-L., Tanga B.-H., Wu H., Tanga R., Bi Y.* Atmospheric correction of highspatial-resolution satellite images with adjacency effects: Application to EO-1 ALI data // *Int. J. Rem. Sens.* 2015. vol. 36. no. 19–20. pp. 5061–5074.
19. *Веретенников В.В.* Восстановление микроструктурных параметров грубодисперсного аэрозоля с использованием их регрессионных связей со спектральным ослаблением света в ИК-диапазоне // *Оптика атмосферы и океана.* 2017. Т. 30. № 8. С. 696–704.
20. *Лысенко С.А.* Атмосферная коррекция многоспектральных спутниковых снимков на основе аппроксимационной модели переноса солнечного излучения // *Оптика атмосферы и океана.* 2017. Т. 30. № 9. С. 775–788.
21. *Seidel F.C., Kokhanovsky A.A., Schaepman M.E.* Fast and simple model for atmospheric radiative transfer // *Atmos. Meas. Tech. Discuss.* 2010. vol. 3. no. 4. pp. 1129–1141.
22. *Васильев А.В., Кузнецов А.Д., Мельникова И.Н.* Аппроксимация многократно рассеянного солнечного излучения в рамках приближения однократного рассеяния // *Ученые записки РГГУ.* 2016. № 42. С. 94–103.
23. *Катковский Л.В.* Параметризация уходящего излучения для быстрой атмосферной коррекции гиперспектральных изображений // *Оптика атмосферы и океана.* 2016. Т. 29. № 9. С. 778–784.
24. *Smokty O.I.* Analytical approximation for homogeneous slab brightness coefficients in the case of strongly elongated phase functions *Radiation Processes in the Atmosphere and Ocean* // *Proceedings of International Radiation Symposium (IRS/IAMAS) (IRS'2016).* 2017. pp. 145–149.
25. *Hovenier J.W.* A unified treatment of reflected and transmitted intensities of homogeneous plane-parallel atmospheres // *Astrom. and Astrophys.* 1978. vol. 68. pp. 239–250.
26. *Смоктый О.И.* Моделирование полей излучения в задачах космической спектrophотометрии // *Л.: Наука.* 1986. 352 с.
27. *Smokty O.I.* Development of radiative transfer theory methods on the base of mirror symmetry principle // *Proceedings of International Radiation Symposium (IRS'2000): Current Problems in Atmospheric Radiation.* 2001. pp. 341–344.
28. *Smokty O.I.* The mirror symmetry principle for radiation fields in a vertically non-uniform atmospheric slab // *AIP Conference Proceedings. Ser. "Radiation processes in the atmosphere and ocean (IRS'2012)": Proceedings of the International Radiation Symposium (IRC/IAMAS).* 2013. pp. 135–138.
29. *Yanovitsky E.G.* *Light scattering in inhomogeneous atmospheres* // Berlin: Springer, 1997. 371 p.
30. *Smokty O.I.* Improvements of methods of radiation fields numerical modeling on the basis of mirror reflection principle // *Proceedings of Computational Sci. and Applications, part V (ICCSA'13).* 2013. pp. 1–17.
31. Перенос радиации в рассеивающих и поглощающих средах. Стандартные методы расчета / Под ред. Ж. Ленобль // *Л.: Гидрометеоздат.* 1990. 264 с.
32. *Смоктый О.И., Аниконов А.С.* Рассеяние света в средах большой оптической толщины // *СПб.: Наука.* 2008. 440 с.
33. *Press W., Flannery B., Teukolsky S., Vetterling W.* *Numerical Recipes. The art of Scientific Computing (Fortran Version)* // Cambridge: Cambridge Univ. Press. 1989. 702 p.

Смоктый Олег Иванович — д-р физ.-мат. наук, профессор, Заслуженный деятель науки РФ, лауреат Премии Правительства РФ, академик Международной Академии Астронавтики (Франция), главный научный сотрудник лаборатории «Прикладная информатика» СПИИРАН. Область научных интересов: теория переноса излучения, моделирование полей излучения в задачах дистанционного зондирования Земли из космоса, космическая геоинформатика. Число научных публикаций — 290 научных трудов, в том числе 10 монографий, одного открытия и 6 изобретений. soi@iias.spb.su СПИИРАН, 14-я линия В.О., д. 39, г. Санкт-Петербург, 199178, РФ, п.т./факс +7(812)328-4450.

O.I. SMOKTY
**MODELING OF RADIATION FIELDS OF UNIFORM
 ANISOTROPICALLY SCATTERING SLAB OF ARBITRARY
 OPTICAL THICKNESS**

Smokty O.I. Modeling of Radiation Fields of Uniform Anisotropically Scattering Slab of Arbitrary Optical Thickness.

Abstract. Modeling of radiation fields of an arbitrary optical thickness uniform slab in the case of a weak absorption and strongly elongated phase functions has been carried. The simple modification of classical Ambarzumian's — Chandrasekhar's invariance principle indispensable for the receiving of new non-linear integral equations connected with azimuthal Fourier harmonics of generalized unified photometric function and photometric invariants has been used. These values join upgoing and downgoing radiation fields intensities making use of simple linear manner at arbitrary optical levels in mirror vision directions including fixed azimuthal angles and solar zenith distance. Parametrizations of obtained non-linear integral equations have demonstrated in the absence of reflecting underlying surfaces, placed at the lowest level of considered uniform slab, the possibility to express angular-spatial properties of unified photometrical function and appropriate photometrical invariants taking into account the phase functions strongly elongation near small scattering angles and small slab's absorption with the help of primary scattered radiation field intensities and adaptive fitting multipliers. These functional adaptive corrections have been stipulated by uniform slab's multiple light scattering and possess the clear physical interpretation. The use of mirror reflection (symmetry) principle, elaborated by the author, and conception of unified photometric function allows one to estimate the above-mentioned peculiarities of real environment's phase functions in the framework of photometric invariants numerical modeling. An analysis of appropriate radiative modeling results has shown a dominating influence of primary light scattering in the formation of anisotropically scattered radiation fields of an arbitrary optical thickness uniform slab in the case of weak radiation absorption and strongly elongated phase functions.

Keywords: uniform slab, Ambarzumian's — Chandrasekhar's invariance principle, non-linear integral equations, adaptive parametrization, photometric invariants, unified photometric function, brightness coefficients, radiation fields intensities, primary scattering, fitting functions, Henyey — Greenstein phase function.

Smokty Oleg Ivanovich — Ph.D., Dr. Sci., professor, Honored scientist of Russian Federation, Russian Federation Government Award laureate, Full member of the International Academy of Astronautics (France), main researcher, Laboratory of Applied Informatics, SPIIRAS. Research interests: radiative transfer theory, radiation field modeling in problems of the Earth remote sensing from space, geoinformatics. The number of publications — 290 scientific works, including 10 monographs, one discovery and 6 inventions. soi@ias.spb.su, SPIIRAS, 39, 14-th line V.O., St. Petersburg, 199178, Russia, office phone/fax +7(812)328-4450.

References

1. Ambarcumjan V.A. *Nauchnye trudy* [Scholarly Works]. Yerevan: Armenian SSR Academy of Sciences Publ., 1960. vol. 1. 429 p. (In Russ.).
2. Chandrasekhar S. Radiative transfer. Oxford: Oxford Univ. Press. 1950. 394 p.
3. Sobolev V.V. Rassejanie sveta v atmosferah planet [Light scattering in planetary atmosphere]. Moscow: Nauka, 1972. 335 p. (In Russ.).
4. van de Hulst H.G. Multiple light scattering: Tables, Formulas and Applications. New York, Academic Press. 1980. 739 p.

5. Minin I.N. *Teoriya perenosa izluchenija v atmosferah planet* [The theory of radiation transfer in the planets atmospheres]. Moscow: Nauka, 1988. 264 p. (In Russ.).
6. Bohren C.F., Clothiaux E.E. *Fundamentals of Atmospheric Radiation*. Weinheim: Wiley-VCH, Verlag GmbH. 2006. 479 p.
7. Thomas G.E., Stamnes K. *Radiative Transfer in the Atmosphere and Ocean*. Cambridge, New York: Cambridge University Press. 2006. 540 p.
8. Budak V.P., Klyuykov D.A., Korkin S.V. Complete matrix solution of radiative transfer equation for pile of horizontally slabs. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2011. vol. 117. issue 7. pp. 1141–1148.
9. Budak V.P., Kaloshin G.A., Shagalov O.V., Zheltov V.S. Numerical modeling of the radiative transfer in a turbid medium using the synthetic iteration. *Optics Express*. 2015. vol. 23. no. 15. pp. 829–835.
10. Budak V.P., Zheltov V.S., Lubenchenko A.V., Frejdlin K.S., Shagalov O.V. [A fast and accurate synthetic iteration-based algorithm for numerical simulation of radiative transfer in a turbid medium]. *Optika atmosfery i okeana – Atmospheric and oceanic optics*. 2016. vol. 29. no 9. pp. 739–746. (In Russ.).
11. Budak V.P., Klyuykov D.A., Korkin S.V. Convergence acceleration of radiative transfer equation solution at strongly anisotropic scattering. *Light Scattering Reviews 5: Single Light Scattering and Radiative Transfer*. Berlin: Springer Praxis Books. 2010. pp. 147–204.
12. Ilyushin Ya.A. The advanced small angle approximation with application to the numerical radiative transfer calculations. *Proceedings of International Radiation Symposium (IRS/IAMAS)*. 2013. pp. 105–109.
13. Smokty O.I. Analytical spatial-angular structure of uniform slab radiation field for strongly elongated phase functions. *Proceedings of Computational Sci. and Applications, part V (ICCSA'2016)*. Berlin, Springer. 2016. pp. 110–128.
14. Atberger C. Advances in remote sensing of agriculture: context description, existing operational monitoring systems and major information needs. *Remote Sens*. 2013. no. 5(2). pp. 949–981.
15. Hanes T.U. (Ed.) *Biophysical applications of satellite remote sensing*. Heidelberg–New York–London, Dordrecht: Springer. 2014. 230 p.
16. Zege E.P., Ivanov A.P., Katsev I.L., Prikhach A.S. [Retrieval of optical characteristics of the aerosol atmosphere and Earth's surface by the joint processing of different satellite information]. *Izv. RAN. Fizika atmosfery i okeana – Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*. 2014. vol. 50. no. 2. pp. 215–223. (In Russ.).
17. Belov V.V., Tarasenko M.V. On the accuracy and speed of RTM algorithms for atmospheric correction of satellite images in the visible and UV ranges. *Atmos. and Ocean Opt*. 2014. vol. 27. no. 1. pp. 56–61.
18. Duanabc S.-B., Licd Z.-L., Tanga B.-H., Wua H., Tanga R., Bi Y. Atmospheric correction of highspatial-resolution satellite images with adjacency effects: Application to EO-1 ALI data. *Int. J. Rem. Sens*. 2015. vol. 36. no. 19–20. pp. 5061–5074.
19. Veretennikov V.V. [Retrieval of microstructure parameters of coarse aerosol using their regression relationships with spectral extinction of light in the IR]. *Optika atmosfery i okeana – Atmospheric and oceanic optics*. 2017. vol. 30. no. 8. pp. 696–704. (In Russ.).
20. Lisenko S.A. [Atmospheric correction of multispectral satellite images based on the approximate model of the solar radiation transfer]. *Optika atmosfery i okeana – Atmospheric and oceanic optics*. 2017. vol. 30. no. 9. pp. 775–788. (In Russ.).
21. Seidel F.C., Kokhanovsky A.A., Schaepman M.E. Fast and simple model for atmospheric radiative transfer. *Atmos. Meas. Tech. Discuss*. 2010. vol. 3. no. 4. pp. 1129–1141.
22. Vasilev A.V., Kuznetsov A.D., Melnikova I.N. [Approximation of multiply scattered solar radiation in the framework of a single scattering]. *Uchenye zapiski RGGU – Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University*. 2016. no. 42. pp. 94–103. (In Russ.).

23. Katkovsky L.V. [Parameterization of outgoing radiation for quick atmospheric correction of hyperspectral images]. *Optika atmosfery i okeana – Atmospheric and oceanic optics*. 2016. vol. 29. no. 9. pp. 778–784. (In Russ.).
24. Smokty O.I. Analytical approximation for homogeneous slab brightness coefficients in the case of strongly elongated phase functions *Radiation Processes in the Atmosphere and Ocean. Proceedings of International Radiation Symposium (IRS/IAMAS) (IRS'2016)*. 2017. pp. 145–149.
25. Hovenier J.W. A unified treatment of reflected and transmitted intensities of homogeneous plane-parallel atmospheres. *Astrom. and Astrophys.* 1978. vol. 68. pp. 239–250.
26. Smokty O.I. *Modelirovanie polej izluchenija v zadachah kosmicheskoj spek-trofotometrii* [Modeling of radiation fields in problems of space spectrophotometry]. Leningrad: Nauka, 1986. 352 p. (In Russ.).
27. Smokty O.I. Development of radiative transfer theory methods on the base of mirror symmetry principle. *Proceedings of International Radiation Symposium (IRS'2000): Current Problems in Atmospheric Radiation*. 2001. pp. 341–344.
28. Smokty O.I. The mirror symmetry principle for radiation fields in a vertically non-uniform atmospheric slab. *AIP Conference Proceedings. Ser. "Radiation processes in the atmosphere and ocean (IRS'2012)": Proceedings of the International Radiation Symposium (IRC/IAMAS)*. 2013. pp. 135–138.
29. Yanovitsky E.G. *Light scattering in inhomogeneous atmospheres*. Berlin: Springer, 1997. 371 p.
30. Smokty O.I. Improvements of methods of radiation fields numerical modeling on the basis of mirror reflection principle. *Proceedings of Computational Sci. and Applications, part V (ICCSA'13)*. 2013. pp. 1–17.
31. *Perenos radiacii v rasseivajushhij i pogloshhajushhij sredah. Standartnye metody rascheta* [Radiative transfer in scattering and absorbing atmospheres: Standard computational procedures], Edited by Lenoble J. L.: Gidrometeoizdat, 1990. 264 p. (In Russ.).
32. Smokty O.I., Anikonov A.S. *Rassejanie sveta v sredah bol'shoj opticheskoj tolshhiny* [Light Scattering in Media with Large Optical Depth]. St. Petersburg: Nauka, 2008. 440 p. (In Russ.).
33. Press W., Flannery B., Teukolsky S., Vetterling W. *Numerical Recipes. The art of Scientific Computing (Fortran Version)*. Cambridge: Cambridge Univ. Press. 1989. 702 p.

Signed to print 25.01.2018

Printed in Publishing center GUAP, 67, B. Morskaya, St. Petersburg, 190000, Russia

The journal is registered in Russian Federal Agency for Communications
and Mass-Media Supervision, certificate ПИ № ФС77-41695 dated August 19, 2010 г.
Subscription Index П5513, Russian Post Catalog

Подписано к печати 25.01.2018. Формат 60×90 1/16. Усл. печ. л. 15,06. Заказ № 35.

Тираж 150 экз., цена свободная

Отпечатано в Редакционно-издательском центре ГУАП, 190000, Санкт-Петербург, Б. Морская, д. 67

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи
и массовых коммуникаций,
свидетельство ПИ № ФС77-41695 от 19 августа 2010 г.

Подписной индекс П5513 по каталогу «Почта России»

РУКОВОДСТВО ДЛЯ АВТОРОВ

Взаимодействие автора с редакцией осуществляется через личный кабинет на сайте журнала «Труды СПИИРАН» <http://www.proceedings.spiiras.nw.ru>. При регистрации авторам рекомендуется заполнить все предложенные поля данных.

Подготовка статьи ведется с помощью текстовых редакторов MS Word 2007 и выше. Объем основного текста – от 15 до 25 страниц включительно. Формат страницы документа – А5 (148 мм ширина, 210 мм высота); ориентация – портретная; все поля – 20 мм. Верхний и нижний колонтитулы страницы – пустые. Основной шрифт документа – Times New Roman, основной кегль (размер) шрифта – 10 pt. Переносы разрешены. Абзацный отступ устанавливается размером в 10 мм. Межстрочный интервал – одинарный. Номера страниц не проставляются.

В основную часть допускается помещать рисунки, таблицы, листинги и формулы. Правила их оформления подробно рассмотрены на нашем сайте в разделе «Руководство для авторов».

AUTHOR GUIDELINES

Interaction between each potential author and the Editorial board is realized through the personal account on the website of the journal "Proceedings of SPIIRAS" <http://www.proceedings.spiiras.nw.ru>. At the registration the authors are requested to fill out all data fields in the proposed form.

The submissions should be prepared using MS Word 2007 text editor or higher versions, at that, only manuscripts in *.docx format will be considered. The text of the paper in the main part of it should be from 15 – 25 pages of A5 size that is 210 X 148 mm; orientation – portrait; all margins – 20 mm. The font of the main paper text is Times New Roman of 10 pt font size. The pages' headers and footers should be empty; indentation – 10 mm; line spacing – single; pages are not numbered; hyphenations are allowed.

Certain figures, tables, listings and formulas are allowed in the main section, and their typography is considered by the paper template in more detail in journal web.

ISSN 2078-9181



9 772078 918785 >

