

## НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ ЗЕМЛИ

Журнал **H&ES Research** издается с 2009 года, освещает достижения и проблемы российских инфокоммуникаций, внедрение последних достижений отрасли в автоматизированных системах управления, развитие технологий в информационной безопасности, исследования космоса, развитие спутникового телевидения и навигации, исследование Арктики. Особое место в издании уделено результатам научных исследований молодых ученых в области создания новых средств и технологий космических исследований Земли.

**Журнал H&ES Research входит в перечень изданий, публикации в которых учитываются Высшей аттестационной комиссией России (ВАК РФ), в систему российского индекса научного цитирования (РИНЦ), а также включен в Международный классификатор периодических изданий.**

Тематика публикуемых статей в соответствии с перечнем групп специальностей научных работников по Номенклатуре специальностей:

- 05.11.00 Авиационная и ракетно-космическая техника
- 05.12.00 Радиотехника и связь
- 05.13.00 Информатика, вычислительная техника и управление.

### ИНДЕКСИРОВАНИЕ ЖУРНАЛА H&ES RESEARCH

- NEICON • CyberLenika (Open Science) • Google Scholar • OCLC WorldCat • Ulrich's Periodicals Directory • Bielefeld Academic Search Engine (BASE) • eLIBRARY.RU • Registry of Open Access Repositories (ROAR)

Мнения авторов не всегда совпадают с точкой зрения редакции. За содержание рекламных материалов редакция ответственности не несет. Материалы, опубликованные в журнале – собственность ООО «ИД Медиа Паблшер». Перепечатка, цитирование, дублирование на сайтах допускаются только с разрешения издателя.

ПЛАТА С АСПИРАНТОВ ЗА ПУБЛИКАЦИЮ РУКОПИСИ НЕ ВЗИМАЕТСЯ

Всем авторам, желающим разместить научную статью в журнале, необходимо оформить ее согласно требованиям и направить материалы на электронную почту:  
**HT-ESResearch@yandex.ru.**

С требованиями можно ознакомиться на сайте: **www.H-ES.ru.**  
Все номера журнала находятся в свободном доступе на сайте.

Язык публикаций: русский, английский.  
Периодичность выхода – 6 номеров в год.

© ООО «ИД Медиа Паблшер», 2018

## HIGH TECHNOLOGIES IN EARTH SPACE RESEARCH

**H&ES Research** is published since 2009. The journal covers achievements and problems of the Russian infocommunication, introduction of the last achievements of branch in automated control systems, development of technologies in information security, space researches, development of satellite television and navigation, research of the Arctic. The special place in the edition is given to results of scientific researches of young scientists in the field of creation of new means and technologies of space researches of Earth.

**The journal H&ES Research is included in the list of scientific publications, recommended Higher Attestation Commission Russian Ministry of Education for the publication of scientific works, which reflect the basic scientific content of candidate and doctoral theses. IF of the Russian Science Citation Index.**

Subject of published articles according to the list of branches of science and groups of scientific specialties in accordance with the Nomenclature of specialties:

- 05.07.00 Aviation, space-rocket hardware
- 05.12.00 RF technology and communication
- 05.13.00 Informatics, computer engineering and control.

### JOURNAL H&ES RESEARCH INDEXING

The opinions of the authors don't always coincide with the point of view of the publisher. For the content of ads, the editorial Board is not responsible. All articles and illustrations are copyright. All rights reserved. No reproduction is permitted in whole or part without the express consent of Media Publisher Joint-Stock company.

POSTGRADUATE STUDENTS FOR PUBLICATION OF THE MANUSCRIPT WILL NOT BE CHARGED

All authors wishing to post a scientific article in the journal, you must register it according to the requirements and send the materials to your email: **HT-ESResearch@yandex.ru.**

The requirements are available on the website: **www.H-ES.ru.**  
All issues of the journal are in a free access on a site.

Language of publications: Russian, English.  
Periodicity – 6 issues per year.

© "Media Publisher", LLC 2018

**Учредитель:**  
ООО «ИД Медиа Паблшер»

**Издатель:**  
СВЕТЛАНА ДЫМКОВА

**Главный редактор:**  
КОНСТАНТИН ЛЕГКОВ

**Редакционная коллегия:**  
**БОБРОВСКИЙ В.И.**, д.т.н., доцент;  
**БОРИСОВ В.В.**, д.т.н., профессор,  
Действительный член Академии  
военных наук РФ;  
**БУДКО П.А.**, д.т.н., профессор;  
**БУДНИКОВ С.А.**, д.т.н., доцент,  
Действительный член Академии  
информатизации образования;  
**ВЕРХОВА Г.В.**, д.т.н., профессор;  
**ГОНЧАРЕВСКИЙ В.С.**, д.т.н., профессор,  
заслуженный деятель науки  
и техники РФ;  
**КОМАШИНСКИЙ В.И.**, д.т.н., профессор;  
**КИРПАНЕВ А.В.**, д.т.н., доцент;  
**КУРНОСОВ В.И.**, д.т.н., профессор,  
академик Арктической академии наук,  
член-корреспондент Международной  
академии информатизации, академик  
Международной академии обороны,  
безопасности и правопорядка,  
Действительный член Российской  
академии естественных наук;  
**МАНУИЛОВ Ю.С.**, д.т.н., профессор;  
**МОРОЗОВ А.В.**, д.т.н., профессор,  
Действительный член Академии  
военных наук РФ;  
**МОШАК Н.Н.**, д.т.н., доцент;  
**ПРОРОК В.Я.**, д.т.н., профессор;  
**СЕМЕНОВ С.С.**, д.т.н., доцент;  
**СИНИЦЫН Е.А.**, д.т.н., профессор;  
**ШАТРАКОВ Ю.Г.**, д.т.н., профессор,  
заслуженный деятель науки РФ.

**N&ES Research** зарегистрирован  
Федеральной службой по надзору  
за соблюдением законодательства в  
сфере массовых коммуникаций и охране  
культурного наследия.  
Издательская лицензия  
ПИ № ФС 77-60899.

**Адрес редакции:**  
111024, Россия, Москва,  
ул. Авиамоторная, д. 8, офис 512-514;

194044, Россия, Санкт-Петербург,  
Лесной Проспект, 34-36, к. 1,  
Тел.: +7(911) 194-12-42.

**Отдел развития и рекламы:**  
ОЛЬГА ДОРОШКЕВИЧ  
ovd@media-publisher.ru  
тел.: 8(916) 951-55-36

**Дизайн и компьютерная верстка:**  
ОКСАНА ИВАНОВА  
okvivanova@yandex.ru

# СОДЕРЖАНИЕ

## АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

**Семенец В.О., Трухин М.П.**  
Способы противодействия беспилотным летательным аппаратам ..... 4

**Стародубцев В.Г., Мышко В.В., Ткаченко В.В.**  
Аппаратная и программная реализация алгоритма формирования  
последовательностей Гордона-Миллса-Велча ..... 13

**Чикуров В.А., Алейник В.В., Спичкина Д.Р.**  
Методика оценивания качества выполнения операций  
технологического процесса подготовки и пуска ракет  
космического назначения при возникновении нештатной ситуации..... 21

## РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

**Курчидис В.А., Анисимов О.В., Яценко А.В.**  
Формирование концептуальной модели радиоэлектронной аппаратуры  
на основе семантических шаблонов, интегрированных  
со средой разработки электрических схем ..... 30

**Елагин В.С., Зарубин А.А., Онуфриенко А.В.**  
Эффективность DPI-системы для идентификации трафика  
и обеспечения качества обслуживания OTT-сервисов ..... 40

**Котов В.С., Резникова Р.К., Морин А.А.**  
Реализация концепции по поддержанию  
в работоспособном состоянии существующих  
радиотехнических систем ближней навигации и посадки ..... 54

**Арутюнян Т.Р., Некрасов С.А.**  
Двусторонние методы интегрирования жестких систем обыкновенных  
дифференциальных уравнений на основе интеграла Дюамеля..... 64

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

**Винокуров А.В.**  
Методика адаптивного управления защищенностью  
видовой информации путем перераспределения ее избыточности ..... 74

**Давидюк Н.В., Выборнова О.Н.**  
Учет характеристик технических средств обнаружения  
при автоматизированном проектировании оценке эффективности  
комплексных систем безопасности объектов ..... 84

**Хрущ Р.М.**  
Фотопланы (ортофотопланы): сущность, содержание  
и развитие методов, способов и средств трансформирования снимков ..... 94

# CONTENTS

## AVIATION, SPACE-ROCKET HARDWARE

<b>Semenets V.O., Trukhin M.P.</b> Methods for countering unmanned aircrafts .....	4
<b>Starodubtsev V.G., Myshko V.V., Tkachenko V.V.</b> Hardware and software realization of algorithm of formation of Gordon-Mills-Welch sequences .....	13
<b>Chikurov V.A., Aleinik V.V., Spichkina D.R.</b> The technique for estimating the quality of technologic operations of rocket-vehicle preparation and launch in case of emergency situation .....	21

## RF TECHNOLOGY AND COMMUNICATION

<b>Kurchidis V.A., Anisimov O.V., Iashchenko A.V.</b> Radioelectronic equipment conceptual model formation based on semantic templates integrated with the electrical circuits design environment .....	30
<b>Elagin V.S., Zarubin A.A., Onufrienko A.V.</b> Efficiency of DPI-system for traffic identification and maintenance of OTT services quality .....	40
<b>Kotov V.S., Reznikova R.K., Morin A.A.</b> Realization of the concept to maintain the existing radio systems of near navigation and landing in an efficient state .....	54
<b>Harutyunyan T.R., Nekrasov S.A.</b> Bilateral methods of integrating stiff systems of ordinary differential equations on the basis of Duhamel integral.....	64

## INFORMATICS, COMPUTER ENGINEERING AND CONTROL

<b>Vinokurov A.V.</b> Methodology of adaptive control of protection of species information by redistribution of its excess.....	74
<b>Davidyuk N.V., Vybornova O.N.</b> Account of detection devices technical characteristics during automated design and effectiveness assessment of complex security systems .....	84
<b>Khrush R.M.</b> Airplans (orthophotomaps) essence, content and the development of methods, ways and means of photo transformation .....	94

**Founder:**  
"Media Publisher", LLC

**Publisher:**  
SVETLANA DYMKOVA

**Editor in chief:**  
KONSTANTIN LEGKOV

**Editorial board:**  
**BOBROWSKY V.I.**, PhD, Docent;  
**BORISOV V.V.**, PhD, Full Professor;  
**BUDKO P.A.**, PhD, Full Professor;  
**BUDNIKOV S.A.**, PhD, Docent,  
 Actual Member of the Academy  
 of Education Informatization;  
**VERHOVA G.V.**, PhD, Full Professor;  
**GONCHAREVSKY V.S.**, PhD, Full Professor,  
 Honored Worker of Science  
 and Technology of the Russian Federation;  
**KOMASHINSKIY V.I.**, PhD, Full Professor;  
**KIRPANEEV A.V.**, PhD, Docent;  
**KURNOSOV V.I.**, PhD, Full Professor,  
 Academician of Academy of Sciences  
 of the Arctic, corresponding member  
 of the International Academy of  
 Informatization, International  
 Academy of defense, security,  
 law and order, Member of the Academy  
 of Natural Sciences;  
**MANUILOV Y.S.**, PhD, Full Professor;  
**MOROZOV A.V.**, PhD, Full Professor,  
 Actual Member of the Academy  
 of Military Sciences;  
**MOSHAK N.N.**, PhD, Docent;  
**PROROK V.Y.**, PhD, Full Professor;  
**SEME NOV S.S.**, PhD, Docent;  
**SINICYN E.A.**, PhD, Full Professor;  
**SHATRAKOV Y.G.**, PhD, Full Professor;  
 Honored Worker of Science  
 of the Russian Federation.

Journal H&ES Research has been  
 registered by the Federal service on  
 supervision of legislation observance  
 in sphere of mass communications and  
 cultural heritage protection.  
 Publishing license  
 ПИ № ФС 77-60899.

**Address of edition:**  
 111024, Russia, Moscow,  
 st. Aviamotornaya, 8, office 512-514;

194044, Russia, St. Petersburg,  
 Lesnoy av., 34-36, h.1,  
 Phone: +7 (911) 194-12-42.

**Development and advertizing  
 department:**  
 OLGA DOROSHKVICH  
 ovd@media-publisher.ru,  
 tel.: 8(916) 951-55-36

**Design and computer imposition:**  
 OKSANA IVANOVA  
 okvivanova@yandex.ru

doi: 10.24411/2409-5419-2018-10070

# СПОСОБЫ ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ БЕСПИЛОТНЫМ ЛЕТАТЕЛЬНЫМ АППАРАТАМ

## СЕМЕНЕЦ

Вячеслав Олегович<sup>1</sup>

## ТРУХИН

Михаил Павлович<sup>2</sup>

## АННОТАЦИЯ

Сегодня актуальность оперативного противодействия беспилотным летательным аппаратам очень высока. Современный беспилотный аппарат способен не только вести видеоразведку на заданной территории, но и вести конкретный объект в течение длительного времени. А «привязные» летательные аппараты могут на протяжении нескольких дней, недель или даже месяцев вести наблюдение за прикрепленной к нему территорией.

Кроме разведки, беспилотные аппараты, способны перевозить и транспортировать опасные грузы на охраняемые объекты. Данная проблема весьма остро стоит для тюрем и колоний и требует особых методов борьбы. Так же в качестве груза может перевозиться взрывчатое вещество, что превращает такой летательный аппарат в оружие, способное выполнять диверсионные и террористические задачи. Борьба с нарушителями в данном случае, должна приобретать уже совсем другой характер.

Важным аспектом современной борьбы с летательными аппаратами, является метод раннего обнаружения. Это позволяет выиграть необходимое время и использовать верную систему противодействия. Так как, например, аппарат со взрывчатым веществом на борту, опасно сбивать над населенным пунктом и если вовремя не обнаружить данный объект, то список возможных методов борьбы уменьшается в несколько раз. Так же стоит учитывать то, что не каждый объект может позволить себе дорогой оборонный комплекс, способный вести борьбу на расстоянии нескольких километров. Учитывая данный факт, все большую актуальность приобретают программные методы борьбы с беспилотными летательными аппаратами. Однако данная система требует постоянного обновления программного обеспечения средств.

В работе рассмотрены основные виды беспилотных летательных аппаратов, а так же современные методы борьбы с их несанкционированным проникновением на охраняемую территорию. Показана эффективность приведенных методов касательно различных типов беспилотных летательных аппаратов.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** беспилотный летательный аппарат; мультикоптеры; конвертопланы; глайдер; классификация беспилотных аппаратов; методы противодействия.

## Сведения об авторах:

<sup>1</sup> аспирант кафедры общепрофессиональных дисциплин технических специальностей Уральского технического института связи и информатики – филиал Сибирского государственного университета телекоммуникаций и информатики, г. Екатеринбург, Россия, sublane@mail.ru

<sup>2</sup> к.т.н., доцент кафедры общепрофессиональных дисциплин технических специальностей Уральского технического института связи и информатики – филиал Сибирского государственного университета телекоммуникаций и информатики, г. Екатеринбург, Россия, mptru@mail.ru

Сегодня актуальность борьбы с радиоуправляемыми устройствами на охраняемых объектах очень высока. Современный беспилотный летательный аппарат, помимо функции разведки и слежения, способен пронести различные грузы для дальнейших диверсионных действий. А современная ценовая доступность подобных устройств на рынке привела к тому, что сегодня каждый может купить малое радиоуправляемое устройства для своих целей.

Что бы рассмотреть основные методы противодействия малым беспилотным летательным аппаратам, и понять какой метод борьбы является наиболее эффективным, необходимо классифицировать беспилотные аппараты по функциональной разновидности, а так же изучить современные методы обороны. Далее на основании этих данных можно сделать вывод об эффективности той или иной системы обороны.

### **Классификация беспилотных аппаратов по конструктивным особенностям**

#### **Самолёты**

Это беспилотные летательные аппарата, которые имеют в своей конструкции одно или несколько крыльев, зафиксированных на корпусе.

За счет высоких аэродинамических свойств, они имеют высокую скорость и дальность полета, но уступают в мобильности и маневренности. Так же важным недостатком является сложность управления, что сильно повышает риск аварии в руках неопытного пилота.

К данному типу можно отнести и такие модифицированные конструкции, которые имеют функцию «Вертикального взлета», за счет специального механизма, но после продолжают полет, как стандартные самолеты с дистанционным управлением.

#### **Мультикоптеры**

Высокую популярность приобрели сравнительно недавно, примерно с 2010 года. Представляют собой корпус, произвольной формы с различным числом пропеллеров. Как правило, это от 2 до 8 винтов. Наибольшее распространение получили квадрокоптеры (летательные аппараты с 4 пропеллерами).

Управление такими беспилотными летательными аппаратами простое, а распределенные винты и возможность зависания в воздухе делает их очень маневренными. Главным недостатком является низкая скорость и продолжительность полета.

#### **Вертолеты**

Летальные аппараты данного типа имеют один или несколько винтов и представляют собой классический вертолет. Основными достоинствами является более продолжительное время работы, возможность зависания

в воздухе и более простое управление. К недостаткам относится все же малое время работы.

#### **Конвертопланы**

Конвертопланы это такие беспилотные летательные аппараты, которые могут взлетать и садиться вертикально, за счет того, что его двигатели могут поворачиваться на 90–180 градусов. После процедуры взлета, они продолжают полет, как обычные самолеты и опираются на крыло, зафиксированное на корпусе.

Другой модификацией конвертоплана является конструкция с фиксированным двигателем, но направление тяги задается поворотами жалюзи.

Достоинствами является: могут взлетать, как мультикоптеры, но вести полет, как самолеты. Могут зависать в воздухе, просты в использовании.

К недостатком однако относится более низкая мобильность и маневренность, чем у мультикоптеров.

Встречается использование кэнардов — объединенных в блоки канальных электровентиляторов. Поворачивая такие кэнарды, беспилотник может совершать вертикальный взлет, а затем двигаться «по-самолетному». Хвостовые кэнарды играют также роль рулей.

#### **Глайдеры (планеры)**

Это беспилотные летательные аппараты, которые не имеют двигателя или имеют двигатель невысокой мощности, который не может обеспечить постоянное пребывание машины в воздухе и самостоятельный взлет, но позволяет корректировать траекторию и курс движения.

Такой двигатель позволяет обеспечить приземление в заданной точке или обеспечить более длительную продолжительность полета за счет пребывания аппарата в восходящих воздушных потоках. Если в летательном аппарате отсутствует двигатель, то управление осуществляется путем управления микропроцессором.

Основное применение — это разведка. Информация с борта передается на спутник или аппарат сопровождения.

Взлет осуществляется либо с катапульты, либо с вышшенности.

#### **Тейлситтеры**

Беспилотный летательный аппарат, который, оказавшись в воздухе изменяет свое положение на горизонтальное и продолжает полет, как самолет. В момент посадки, дрон вновь принимает вертикальное положение и производит приземление на специальные приспособления, которые отходят от крыльев или хвоста летательного аппарата. Поворотные элементы в данной конструкции отсутствуют.

Достоинства

- способность вертикального взлета как у коптера (не требует катапульты или ВПП);

- способность полета по-самолетному с опорой на фиксированное крыло;
- способность к зависанию в заданной точке.

### Привязные беспилотники

Данный тип беспилотных летательных аппаратов был разработан с целью отделения от него батареи питания, так как она является самым тяжелым элементом. Соответственно такие беспилотные летательные аппараты соединяются с наземных элементов питания проводом. Данная конструкция позволяет беспилотнику неделями находиться в воздухе.

Как следствие, такие аппараты неспособны передвигаться на большие расстояния, но зато умеют прекрасно зависать в воздухе, что делает их незаменимыми в задачах, связанных с наблюдением или функциями ретрансляции или приема, передачи сигналов.

Привязной беспилотный летательный аппарат, является одним из нестандартных типов беспилотных аппаратов и сильно отличается от других возможностями применения. Основным достоинством, несомненно, является потенциально неограниченное время полета, что позволяет не только проводить разведку, но, например, осуществлять связь в полевых условиях, выполняя, по сути роль, базовой станции. Ниже рассмотрим подробнее конструкцию данного аппарата, на примере патента А.П.Белова и В.Д.Яблокова (рис.1).

На рис. 1, представлена схема конструкции беспилотного летательного аппарата, запатентованного авторами, где:

- 1 — Беспилотная наземная станция;
- 2 — Беспилотный летательный аппарат;
- 3 — Корпус, связанный с наземной станцией;
- 4 — Привязь, связывающая корпус и наземную станцию;
- 5 — Силовой трос;
- 6 — Многофункциональный кабель;
- 7 — Шарнирный механизм силового троса;
- 8 — Электродвигатель, что бы аппарат был автономен в случае необходимости и функционировал без привязи;
- 9 — Винты, один из них соединён с ротором, второй непосредственно с электродвигателем без применения редукторов;
- 10 — Консоль крыла;
- 11 — Киль, обеспечивает ориентацию аппарат в воздухе в зависимости от направления потоков ветра;
- 12 — Направление потоков ветра;
- 13 — Механизм для регулирования длины привязи, как правило, барабанного типа;
- 14 — Управляющий трос системы управления и стабилизации;
- 15 — Механизм, управления длиной троса;
- 16 — Датчик положения летательного аппарата;

- 17 — Усилитель;
- 18 — Двигатель механизма барабанного типа;
- 19 — Жесткий элемент для крепления;
- 20 — Преобразователь энергии, используется с целью уменьшения веса многофункционального кабеля;
- 21 — Пульт управления системой.

При достижении летательным аппаратом заданной высоты висения оператором, с помощью, установленного на беспилотном летательном аппарате оборудования осуществляется наблюдение за окружающим наземную станцию пространством.

### Групповое применение беспилотных аппаратов

Беспилотные аппараты, возможно, формировать в группы с целью дальнейшего совместного использования. В этом случае они все программно объединены в одну систему и выполняют одну общую задачу. Наи-

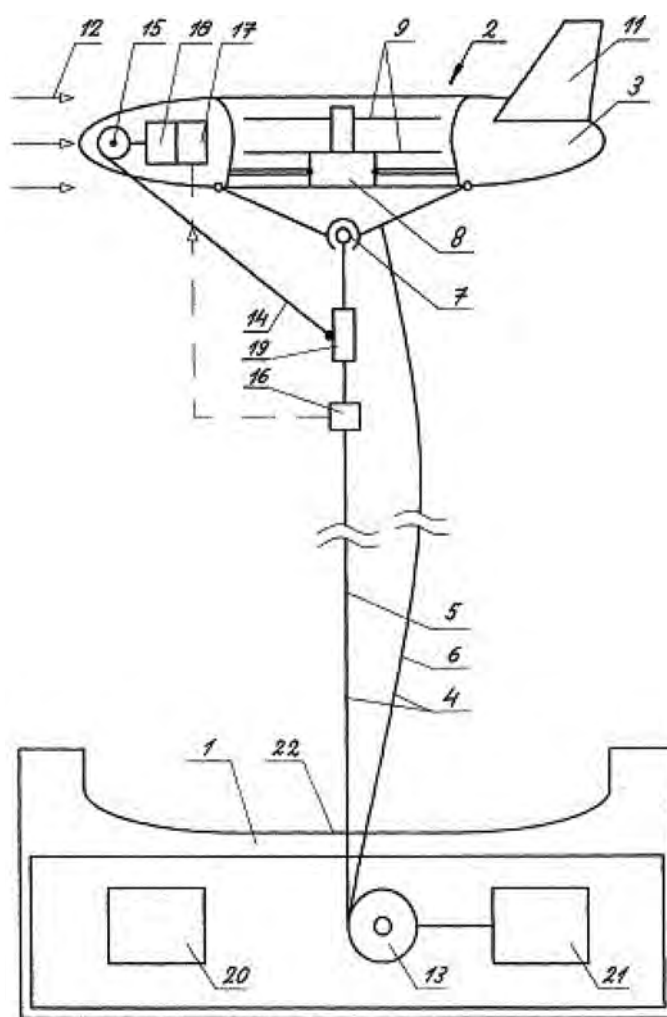


Рис. 1. Конструкция привязного беспилотного летательного аппарата



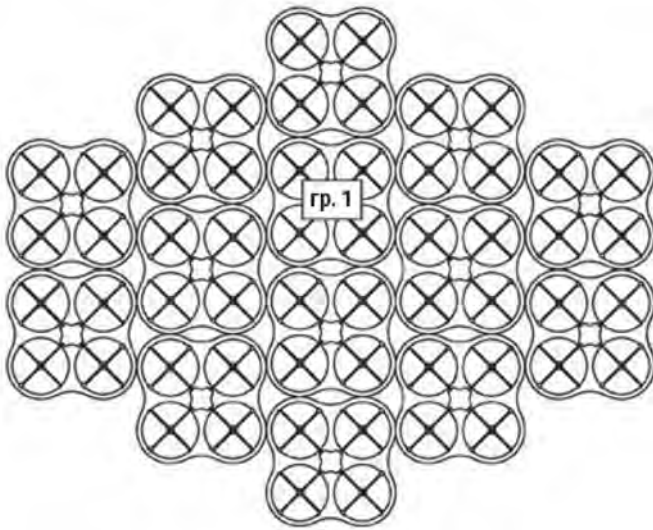


Рис. 2. Группа БЛА для перевозки грузов

более успешно в группы объединяют мультикоптеры, так как они имеют наивысшие показатели мобильности. Ниже на рис. 1 показан пример использования группового применения беспилотных аппаратов для перевозки грузов, запатентованный компанией Amazon.

На рисунке мы видим, что объединённые в группу аппараты способна выполнять более масштабные задачи.

### Способы противодействия беспилотным летательным аппаратам

#### Акустические

Беспилотные летательные аппараты всегда оснащаются гироскопом, который работает на определенной частоте. И если получится подобрать нужную частоту, то гироскоп

можно ввести в состояние резонанса, при котором беспилотник становится, практически не управляем. Как следствие возникает аварийная ситуация и аппарат выходит из строя.

Главной проблемой повсеместного использования данного метода защиты, является сложность подбора резонансной частоты. Некоторые гироскопы работают в ультразвуковом диапазоне, а некоторые в слышимом. Команда из института KAIST подтвердила экспериментально эффективность данного метода в 50% случаев. Из чего можно сделать вывод о том, что данный метод не является универсальным.

Известны случаи, когда удавалось сделать мультикоптер практически неуправляемым, создавая для акселерометра шумы. Есть ряд своих источников вибраций и помех для данного устройства, например, пропеллеры, вентильные двигатели, крепления, которые производители пытаются уменьшить с помощью фильтром.

Ниже на рис. 3, продемонстрируем график уровня шума без использования амортизирующей прокладки и, наоборот, при ее применении.

Как мы видим если не защищать таким образом акселерометр летательного аппарата, то шумы становятся слишком высокими и мешают работе системе стабилизации. На основании этих данных именно акселерометр так же может быть уязвимым местом для акустических методов борьбы с беспилотниками.

#### Лазерные

LWS (Laser Weapon System) или лазерные системы — одно из самых перспективных направлений. Так как обладают внушительными поражающими воздействиями и в то же время имеют компактные размеры.

При испытаниях в Аризоне были обнаружены цели на расстоянии до 35 километров, а мощность всего в 2 кВт,

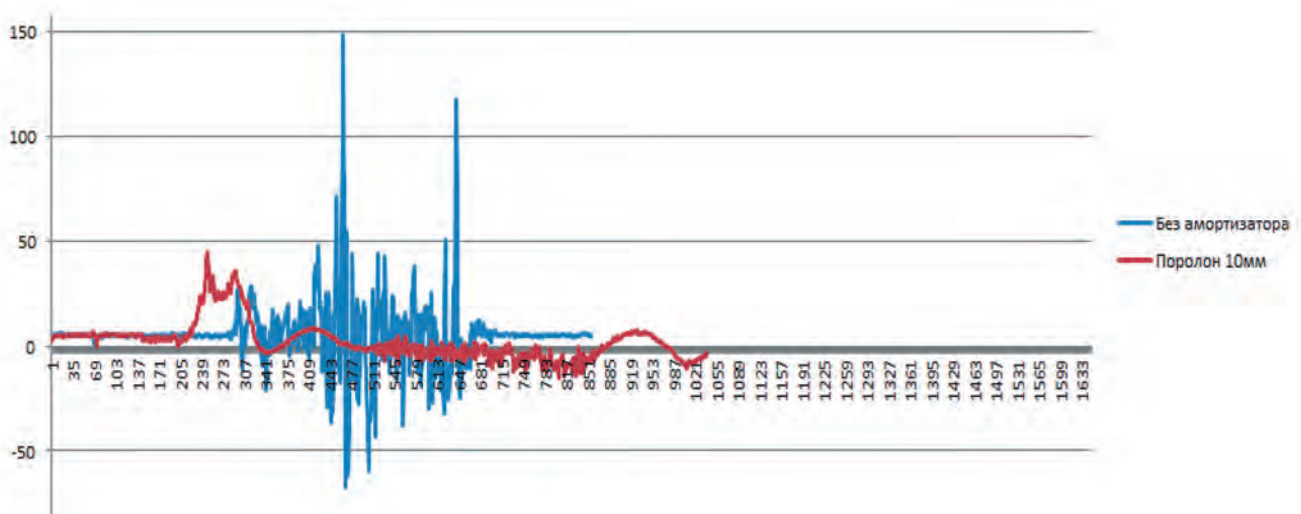


Рис. 3. Уровень шума

позволяет вывести из строя беспилотный летательный аппарат, малых размеров посредством повреждения сенсоров, датчиков, винтов и других уязвимых элементов.

Собранный современный прототип данной установки имеет вес около 300 килограмм, водяную систему охлаждения и резервную систему питания от аккумуляторов. Так же на рынок еще в 2015 году вышла Немецкая установка мощностью чуть менее 40 кВт, способная уничтожать цели на расстоянии до 5 километров.

### Микроволновые

Принцип действия данной системы защиты в том, что бы дистанционно вывести из строя часть бортовой электроники беспилотного аппарата.

Данный метод, является практически универсальным, однако требует очень больших энергетических затрат и установку дорогостоящего оборудования. Поэтому данными установками могут быть оснащены только крупные предприятия и оборонные комплексы.

Так же специфика установки не гарантирует безопасность других летающих объектов в зоне поражения оборонительного сооружения.

### РЭС / РЭБ

Существуют и разрабатываются РЭС различного типа действия. Можно выделить следующие виды действия РЭС:

- системы автоматического обнаружения беспилотника в заданном секторе (оптические, радарные, акустические, по-радиоизлучению, комбинированные);
- системы перехвата управления беспилотником;
- системы постановки помех в канале управления беспилотником;
- системы постановки помех для работы систем геопозиционирования БЛА на частотах GPS / ГЛОНАСС и других систем спутникового геопозиционирования;
- системы вносящие помехи в работу бортовой электроники, включая системы уничтожения бортовой электроники (системы на базе ЭМИ, микроволновые системы).

В Соединенных Штатах Америки были представлены противоугонные системы нового поколения, которые способны обнаружить «беспилотник-нарушитель», заглушить сигнал исходящий от него и обезвредить его. Регламентируемая дальность данной системы в районе 2 км. Рабочая модель представлена американской компанией DroneShield.

### Сети

Захват дрона сетью технически самый нехитрый способ борьбы с беспилотными аппаратами.

Данные установки бывают двух типов:

1. Захват нарушителя с помощью дрона перехватчика. Достаточно подлететь к цели, накинуть на нее сеть и она сама запутается в винтах, тем самым сбив нарушителя.

2. Второй метод подразумевает наземную установку, которая с земли будет метать сеть в нарушителя.

Оба метода требуют определенной сноровки и навыков, что так же не делает данный способ универсальным.

### Хаккинг БЛА (перехват управления беспилотником)

Хаккинг это очень популярное и отдельное направление, как борьбы с беспилотными летательными аппаратами, так и захвата данных устройств в целях кражи. Поэтому данное направление очень динамично развивается, но так же быстро производители находят способы защиты программного обеспечения дрона от внешних воздействия.

Выделяют следующие основные способы взлома беспилотников:

1. Получение доступа к управлению за счет взлома зашифрованного канала связи или подмены данных авторизации.
2. Использование уязвимостей ПО, включая переполнение буфера.
3. Использование интерфейсов и каналов данных оригинального ПО для «протаскивания» стороннего кода, например.

Стартап ApolloShield разработал и представил широкой публике систему автоматической борьбы с нарушителями. Они заявляют, что их разработка обнаруживает заблудившийся беспилотный аппарат и отправляет его домой по средством взлома и отправки сигнал подобных помех. Данная система хорошо подходит для тюрем, аэропортов, отелей, ядерных объектов, правительственных учреждений и публичных демонстраций, а так же охраны социально важных объектов.

Система спроектирована из отдельных модулей, позволяя покрывать большую территорию. А данные, поступающие из различных сегментов сети, обрабатываются и заносятся в единую базу данных, а далее передаются в центр управления.

Для корректной работы системе требуется длительная калибровка и указание уникальных идентификационных номеров аппаратов, которым разрешен полет на охраняемой площади.

Однако стоит отметить, что данная система требует постоянной калибровки, обновления программного обеспечения и обновления. А так же требует время на развертывание. Данную систему так же нельзя назвать универсальной по причине того, что программное обеспечение постоянно обновляется и система может не обладать достоверными данными о конфигурациях беспилотника-нарушителя.



Известно, что одним из важных параметров, которые определяют качество, и комфорт пилотирования является экспонента. Это нелинейное поведение отклика система на изменение сигнала управления. Принцип формирования нелинейного сигнала определяется по следующей формуле (1):

$$\exp(x) = \frac{e^{kx} - 1}{e^k - 1} \quad (1)$$

где  $x$  — значение отклонения рукоятки;  
 $k$  — коэффициент пропорциональности

Но, что бы постоянно не загружать процессор данными вычислениями, эти данные уже забиты в таблицу, откуда просто подставляются в систему. И во время работы пульта, данные из таблицы, накладываются на линейную зависимость по формуле (2):

$$Y = N * \exp(x) + (1 - N) * x \quad (2)$$

где  $N$  — это процент экспоненты в настройках пульта. Другими словами, чем больше процент экспоненты  $N$ , тем сильнее искажается линейная зависимость в соответствии со значениями из таблицы (рис. 4).

Высокая экспонента позволяет плавно управлять летательными аппаратами, однако не дает быстро реагировать для совершения резких маневров.

Используя эти данные можно предположить, что, так как экспонента настраивается индивидуально под каждый летательный аппарат непосредственно пилотом, то это является доступным для воздействия извне параметром. Прямое воздействие на экспоненту не позволит захватить управление аппаратами, однако обеспечит практиче-

ски полное отсутствие управляемости и может привести к аварийным ситуациям.

Так же воздействие на данный параметр может оказаться значительно проще, чем полностью захватить беспилотный аппарат противника.

## Вредоносные функции беспилотных летательных аппаратов и методы защиты

### Оптическая разведка

Самое распространенное применение беспилотных летательных аппаратов нарушителями. Как правило, на мультикоптер крепится камера, которая производит съемку местности и передает данные оператору или же производит запись на карту памяти.

Съемка может продолжаться от нескольких минут, но нескольких дней и даже больше, например, в случае использования привязного беспилотного аппарата со стационарной батареей питания.

Задачи разведки может выполнять практически любой тип беспилотников, поэтому универсальный метод борьбы с данным типом нарушителей подобрать практически невозможно.

Однако можно с уверенностью сказать, что в данном случае наиболее дешевым и универсальным способом будет программный взлом и дальнейшей деактивация летательного аппарата.

Механические способы воздействия на «летающие камеры» возможны к применению, однако стоит учитывать, что они довольно дороги в установке и обслуживании, поэтому их применение возможно только на особо важных объектах.

### Несанкционированная доставка грузов

Объектами риска в данной ситуации могут быть колонии и тюрьмы, пограничные зоны, охраняемые открытые объекты с зоной досмотра и другие объекты. Поэтому очевидно то, что высота полета летательного аппарата должна быть не большой, а мобильность и маневренность, должны отвечать высоким требованиям.

Очевидно, что для доставки грузов подходят только мультикоптеры, так как только они отвечают данным требованиям. Например, Walkera QR X800 способен поднимать грузы до 1.5 кг.

Хорошим способом борьбы в данных ситуациях будут сети, так как они позволяют обезвредить летательный аппарат и получить переносимый им груз. Однако не на всех объектах, возможно, установить данные комплексы защиты.

Вторым способ борьбы может быть «хаккинг» беспилотника, однако многие летательные аппараты, запрограммированы в случае попытки взлома, возвращаться в хозяину, тем самым упускается возможность заполучить

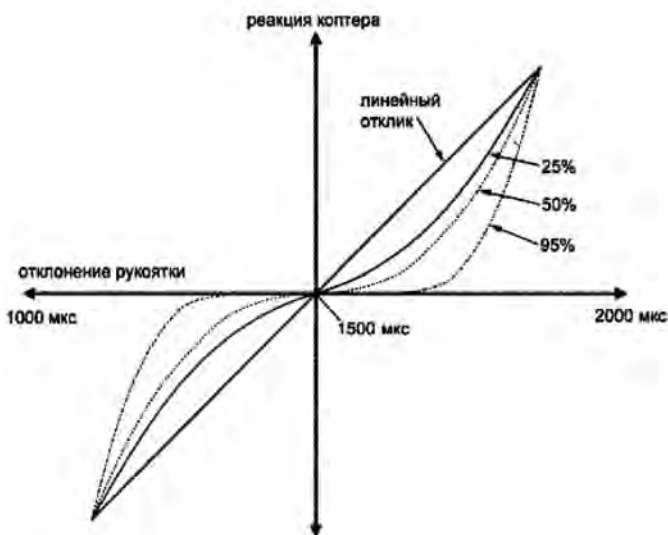


Рис. 4. Экспонента сигнала управления

переносимый груз, если стоит такая задача. Хорошо в данном случае подойдет отправка сигналоподобной помехи с целью подачи команды на посадку. Однако данный метод требует определенных навыков и времени при калибровке оборудования.

### **Диверсионные задачи**

В случае возникновения диверсионной угрозы, главным фактором становится время. Беспилотный летательный аппарат, необходимо обезвредить до момента его активации, поэтому основной задачей является раннее обнаружение угрозы.

Малый летательный аппарат неспособен переносить много взрывчатого вещества, поэтому нарушитель будет стараться, как можно ближе приблизиться в цели, что бы произвести максимально точный удар и принести, как можно больший ущерб.

Для выполнения таких задач хорошо подходят одноразовые беспилотные аппараты, и как следствие перед ними не стоит задачи возврата к оператору. Главной задачей является максимально быстрое обезвреживание такого аппарата или его ликвидация, возможны варианты перехвата управления и устранение из охраняемой зоны.

Хорошим способом противодействия будут: лазерные установки и дроны перехватчики, так как они способны обезвредить объект на максимально большом расстоянии. В случае заблаговременного обнаружения цели, возможны меры по перехвату управления.

### **Радиоэлектронная борьба**

Задачей в данном случае является искажения или глушение сигнала сотовой, спутниковой или радиосвязи. Задача может выполняться привязными беспилотниками, если цель долговременное воздействие, а так же мультикоптерами и вертолетами, так как они способны длительное время зависать в воздухе.

В данной ситуации фактор времени менее важен, чем в случае с диверсией, поэтому возможно обезвреживание летательного аппарата любым способом.

### **Перехват управления другими БПЛА**

В данном случае, цель нарушителя — кража другого беспилотного аппарата. Чаще всего применяются мультикоптеры. Сложность обезвреживания нарушителя состоит в том, что велика вероятность повреждения собственного летательного аппарата. Поэтому в данной ситуации требуются высокоточные методы воздействия, а именно лазерные установки, в редких случаях микроволновые. При наличии опытного пилота возможно использование сетей. Но все эти способы дорогостоящие и не мобильны.

Но чаще всего самым эффективным методом защиты являются программные методы, направленные на защиту

беспилотного от взлома и программирование его на возвращение в случае попытки взлома.

### **Заключение**

В данной статье мы проанализировали основные типы беспилотных летательных аппаратов и рассмотрели популярные методы борьбы с ними и возможные угрозы исходящие от них. Из представленных данных можно сделать вывод, что на данный момент не существует универсального метода борьбы с беспилотными летательными аппаратами и каждый метод имеет свои достоинства и недостатки. Наиболее перспективное направление на наш взгляд это воздействие на дроны с помощью стороннего сигнала и тем самым получение доступа к их управлению. Каждый беспилотный аппарат имеет свою частоту и тип сигнала по средствам, которого производится управление. Если удастся найти способ быстро формировать схожий сигнал для управления летательным аппаратом, то с большей долей вероятности можно будет сформировать сигналоподобную помеху и если не заполучить беспилотник себе, то по крайней мере нарушить систему его управления.

Механические способы борьбы с БЛА так же являются универсальными и эффективными методами, однако подходят не для всех ситуаций и требуют определенной сноровки и навыков команды противодействия. Но стоит отметить, что, например, для борьбы с привязанными дронами метод механического противодействия будет являться наиболее простым и эффективным в сравнении с другими методами.

Но если рассматривать дроны типа самолет или конвертопланы, то против них данный способ противодействия будет практически бесполезен, так как попросту не будет времени развернуть или поднять в воздух систему защиты, самолет уже выполнит свою задачу, будь то, разведка или диверсионные цели. Так как данный тип беспилотных аппаратов имеет высокую скорость полета.

Поэтому важной задачей в подобных ситуациях, является раннее обнаружение угрозы и своевременный выбор средства защиты.

Отсюда можно сделать вывод, что основной задачей на сегодняшний день — является поиск универсального способа борьбы с любыми типами БЛА. Наибольшую перспективу в данном направлении имеют программные методы защиты, которые позволяют перехватить управление беспилотным аппаратам и использовать его по своему усмотрению. Однако разнообразие моделей и принципов устройств не дают подобрать универсальный метод программной защиты, так как его наличие делает беззащитными гражданские беспилотные аппараты от попыток «угона» аппарата.

Хорошим решением является направленный посыл сигналоподобной помехи, которая будет дезориентировать беспилотный аппарат и приводить к аварийным ситуации-

ям. Однако такой метод не всегда подходит для случаев, когда на борту летательного аппарата находится взрывчатое вещество или он переносит ценный груз, который необходимо заполучить. Это так же не позволяет считать данный метод универсальным, однако на наш взгляд это направление наиболее перспективно в целях универсального и повсеместного использования.

### Литература

1. *Василин Н. Я.* Беспилотные летательные аппараты. М.: Попурри, 2003. 272 с.
2. *Биард Р. У., МакЛэйн Т. У.* Малые беспилотные летательные аппараты: теория и практика: пер с англ. М.: Техносфера, 2016. 312 с.
3. *Тищенко М. А., Некрасов А. С.* Вертолеты. Машиностроение. М.: Машиностроение, 1976. 366 с.
4. *Красильщикова М. Н., Себрякова Г. Г.* Современные информационные технологии в задачах навигации и наведения беспилотных маневренных летательных аппаратов. М.: Физматлит, 2009. 556 с.
5. *Зинченко О. Н.* Беспилотные летательные аппараты: применение в целях аэрофотосъемки для картографирования. Часть 1. URL: <http://www.racurs.ru/?page=681> (дата обращения 12.11.2017).
6. Беспилотный летательный аппарат БПЛА. URL: <http://www.tadviser.ru/index.php> (дата обращения 12.11.2017).
7. *Ким Н. В., Крылов И. Г.* Групповое применение беспилотного летательного аппарата в задачах наблюдения // Труды МАИ. 2012. № 62. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=35507> (дата обращения 05.11.2017).
8. *Ким Н. В., Кузнецов А. Г.* Поиск объектов на основе анализа наблюдаемой ситуации // Техническое зрение в системах управления 2011: Сб. трудов научно-технической конференции (Таруса, 15–17 марта 2011 г.) / Под ред. Р. Р. Назирова. М.: Ротапринт ИКИ РАН, 2011. С. 209–213.
9. О борьбе с беспилотными летательными аппаратами. URL: <https://topwar.ru/98134-o-borbe-s-bespilotnymi-letatelnyimi-apparatami.html> (дата обращения 09.12.2017).
10. *Павлушенко М., Евстафьев Г., Макаренко И.* Беспилотные летательные аппараты: история, применение, угроза распространения и перспективы развития. М.: Права человека, 2005. 609 с.
11. *Кашикаров А. П.* Электронные устройства для глушения беспроводных сигналов (GSM, Wi-Fi, GPS и некоторых радиотелефонов). URL: <https://kartaslov.ru/> (дата обращения 05.11.2017).
12. *Белов Л. А.* Устройства формирования СВЧ-сигналов и их компоненты. М.: МЭИ, 2010. 320 с.
13. *Гвоздев В. И., Нефедов В. И.* Объемные интегральные схемы СВЧ. М.: Наука, 1985. 256 с.
14. *Пименов А. И.* Механизмы управления в радиоаппаратуре. М.: Энергия, 1966. 168 с.
15. *Бойко А.* Привязные беспилотники. URL: <http://robotrends.ru/robopedia/privyaznye-bespilotniki> (дата обращения 28.11.2017).
16. *Евсегнеев О.* Амортизируем контроллер мультикоптера // [http://www.poprobot.ru/home/quadrotor\\_accelerometer\\_vibration\\_absorber](http://www.poprobot.ru/home/quadrotor_accelerometer_vibration_absorber). (дата обращения 24.11.2017).
17. *Красильщиков П. А.* Энциклопедия. Планеры России. М.: Полигон-пресс, 2005. 352 с.

## METHODS FOR COUNTERING UNMANNED AIRCRAFTS

### VIACHESLAV O. SEMENETS

Ekaterinburg, Russia, sublane@mail.ru

### MIKHAIL P. TRUKHIN

Ekaterinburg, Russia, mptru@mail.ru

### ABSTRACT

Today the urgency of operational counteraction to unmanned aerial vehicles is very high. A modern unmanned vehicle is able not only to conduct video reconnaissance in a given territory, but also to maintain a specific object for a long time. A "tethered" aircraft can, for several days, weeks or even months, monitor the territory attached to it.

**KEYWORDS:** unmanned aerial vehicle; multicopters; converters; glider; classification of unmanned vehicles; counteraction methods.

In addition to reconnaissance, unmanned vehicles, are able to transport and transport dangerous goods to protected sites. This problem is very acute for prisons and colonies and requires special methods of struggle. Also, as an cargo, an explosive can be transported, which turns such a flying machine into a weapon capable of performing

diversionary and terrorist tasks. The fight against offenders in this case must acquire a completely different character.

An important aspect of modern combat with aircraft is the method of early detection. This allows you to win the necessary time and use the correct countermeasures system. As, for example, a device with an explosive substance on board is dangerous to knock down a settlement and if the object is not found in time, then the list of possible methods of combat is reduced several times. Just take into account the fact that not every object can afford an expensive defense complex, capable of fighting at a distance of several kilometers. Taking into account this fact, software methods of fighting unmanned vehicles are becoming increasingly important. However, this system requires a constant update of software tools.

In this work, we will examine the main types of unmanned aerial vehicles, as well as modern methods of combating their unauthorized entry into the protected area. We will analyze the efficiency of the above methods with respect to various types of unmanned vehicles.

## REFERENCES

1. Vasilin N. Ja. *Bespilotnye letatel'nye apparaty* [Unmanned Aerial Vehicles]. Moscow: Popurri, 2003. 272 p. (In Russian)
2. Beard R.W., McLain T.W. *Small Unmanned Aircraft: Theory and Practice*. Princeton University Press, 2012. XIII. 300 p.
3. Tishhenko M.A., Nekrasov A.S. *Vertolety. Mashinostroenie* [Helicopters. Mechanical engineering]. Moscow: Mashinostroenie, 1976. 312 p. (In Russian)
4. Krasil'shnikova M.N., Sebrjakova G.G. *Sovremennye informacionnyye tehnologii v zadachah navigacii i navedeniya bespilotnyh manevrennykh letatel'nykh apparatov*. [Modern information technologies in the tasks of navigation and guidance of unmanned maneuverable aircraft]. Moscow: Fizmatlit, 2009. 556 p. (In Russian)
5. Zinchenko O.N. *Bespilotnye letatel'nye apparaty: primeneniye v celjah ajerofotos'emki dlja kartografirovaniya (chast' 1)* [Unmanned aerial vehicles: aerial photography application for mapping (part 1)]. URL: <http://www.racurs.ru/?page=681> (date of access 12.11.2017). (In Russian)
6. *Bespilotnyj letatel'nyj apparat* [Unmanned aerial vehicle]. URL: <http://www.tadviser.ru/index.php> (date of access 12.11.2017). (In Russian)
7. Kim N.V., Krylov I.G. Using a group of unmanned aerial vehicle in the task of monitoring. *Trudy MAI* [Proc. of the MAI]. 2012. No. 62. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=35507> (date of access 05.11.2017). (In Russian)
8. Kim N.V., Kuznecov A.G. Object Searching, Basic on an Analysis of Observed Situation. *Computer Vision in Control Systems 2011. Proceedings of the Scientific-Technical Conference (Tarusa, 15-17 March 2011)*. Moscow: IKI RAN., 2012. Pp. 209-213. (In Russian)
9. *O bor'be s bespilotnymi letatel'nymi apparatami* [On the fight against unmanned aerial vehicles]. URL: <https://topwar.ru/98134-o-borbe-s-bespilotnymi-letatel'nymi-apparatami.html> (date of access 09.11.2017). (In Russian)
10. Pavlushenko M., Evstaf'ev G., Makarenko I. *Bespilotnye letatel'nye apparaty: istorija, primeneniye, ugroza rasprostraneniya i perspektivy razvitiya* [Unmanned aerial vehicles: history, application, threat of proliferation and development prospects]. Moscow: Prava cheloveka, 2005. 609 p. (In Russian)
11. Kashkarov A.P. *Jelektronnyye ustrojstva dlja glusheniya besprovodnykh signalov (GSM, Wi-Fi, GPS i nekotorykh radiotelefonov)* [Electronic devices for jamming wireless signals (GSM, Wi-Fi, GPS and some radiotelephones)]. URL: <https://kartaslov.ru/> (date of access 05.11.2017). (In Russian)
12. Belov L.A. *Ustrojstva formirovaniya SVCh-signalov i ih komponenty* [Devices for the formation of microwave signals and their components]. Moscow: MJel, 2010. 320 p. (In Russian)
13. Gvozdev V.I., Nefedov V.I. *Ob'emnye integral'nye shemy SVCh* [Volumetric integrated circuits of microwave]. Moscow: Nauka, 1985. 256 p. (In Russian)
14. Pimenov A.I. *Mehanizmy upravleniya v radioapparature* [Control mechanisms in radio equipment]. Moscow: Jenergiya, 1985. 168 p. (In Russian)
15. Bojko A. *Privjaznyye bespilotniki* [Docked UAVs]. URL: <http://robotrends.ru/robopedia/privjaznyye-bespilotniki> (date of access 28.11.2017). (In Russian)
16. Evsegneev O. *Amortiziruem kontroller mul'tikoptera* [The depreciating controller of a multi-copter]. URL: [http://www.poprobot.ru/home/quadrotror\\_accelerometer\\_vibration\\_absorber](http://www.poprobot.ru/home/quadrotror_accelerometer_vibration_absorber) (date of access 24.11.2017). (In Russian)
17. Krasil'shnikov P.A. *Jenciklopedija. Planery Rossii*. [Encyclopedia. Gliders of Russia]. Moscow: Poligon-press, 2005. 352 p. (In Russian)

## INFORMATION ABOUT AUTHORS:

Semenets V.O., Postgraduate student of the department of general professional disciplines of technical specialties of the Ural Technical Institute of Communications and Informatics (branch) of the federal state budgetary educational institution of higher education "Siberian State University of Telecommunications and Informatics"; Trukhin M.P., PhD, Associate Professor of the Chair of General Professional Disciplines of Technical Specialties of the Ural Technical Institute of Communications and Informatics (branch) of the federal state budgetary educational institution of higher education "Siberian State University of Telecommunications and Informatics".

doi: 10.24411/2409-5419-2018-10071

# АППАРАТНАЯ И ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА ФОРМИРОВАНИЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ ГОРДОНА-МИЛЛСА-ВЕЛЧА

**СТАРОДУБЦЕВ****Виктор Геннадьевич<sup>1</sup>****МЫШКО****Василий Васильевич<sup>2</sup>****ТКАЧЕНКО****Владимир Викторович<sup>3</sup>****АННОТАЦИЯ**

Одним из направлений повышения достоверности передачи и обработки измерительной информации космических средств, входящих в системы управления, навигации и связи, к которым предъявляются повышенные требования по конфиденциальности, является применение широкополосных сигналов на основе псевдослучайных последовательностей не только с хорошими корреляционными свойствами, но и с высокой структурной скрытностью, характеризуемой эквивалентной линейной сложностью. Целесообразность применения последовательностей Гордона-Миллса-Велча (ГМВ) определяется их более высокой структурной скрытностью по сравнению с М-последовательностями, которые также обладают одноуровневой периодической автокорреляционной функцией. Широкому применению ГМВ-последовательностей в системах передачи информации препятствует отсутствие практически реализуемых алгоритмов их формирования. Целью работы является разработка аппаратной и программной реализации алгоритмов формирования ГМВ-последовательностей. При проведении исследований используется математический аппарат теории сигналов и теории конечных полей. ГМВ-последовательности формируются на основе базисных М-последовательностей с аналогичным периодом с учетом распределения корней сомножителей проверочных полиномов. Распределение корней позволяет однозначно определять начальные состояния регистров сдвига через символы базисной М-последовательности. Приведены примеры реализации алгоритма формирования ГМВ-последовательностей с периодом  $N = 1023$  как на основе совокупности регистров сдвига с линейными обратными связями, так и посредством программного вычисления символов искомой последовательности. При программной реализации алгоритма формирования ГМВ-последовательностей используется двойная децимация символов начального состояния и текущих символов последовательности, учитывающая показатели степени корней проверочных полиномов. Полученные результаты позволяют применять ГМВ-последовательности вместо М-последовательностей в системах передачи информации по широкополосным радиоканалам, к которым предъявляются повышенные требования по конфиденциальности. Эквивалентная линейная сложность ГМВ-последовательностей на 3–6 дБ превышает значения для М-последовательностей. С увеличением периода выигрыш по ЭЛС возрастает. Алгоритм может быть использован при разработке методов формирования других классов псевдослучайных последовательностей, допускающих аналитическое представление в конечных полях.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** псевдослучайные последовательности; конечные поля; неприводимые и примитивные полиномы; функция корреляции, эквивалентная линейная сложность; регистры сдвига.

**Сведения об авторах:**

<sup>1</sup>к.т.н., доцент, доцент Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики, г. Санкт-Петербург, Россия, vgstarod@mail.ru

<sup>2</sup>к.т.н., доцент, доцент Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург, Россия, vasvasmishko@mail.ru

<sup>3</sup>к.т.н., преподаватель Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург, Россия, vik\_hohol@mail.ru

**Для цитирования:** Стародубцев В.Г., Мышко В.В., Ткаченко В.В. Аппаратная и программная реализация алгоритма формирования последовательностей Гордона-Миллса-Велча // Научно-технические технологии в космических исследованиях Земли. 2018. Т. 10. № 3. С. 13–20.  
doi: 10.24411/2409-5419-2018-10071



Постоянный рост сложности удаленных технических объектов требует совершенствования систем передачи и обработки измерительной информации космических средств, необходимой как для анализа состояния данных объектов и выработки управляющих воздействий, так и для навигационного обеспечения потребителей [1–2].

Современные системы управления, навигации и связи характеризуются интенсивным использованием сигналов с расширенным спектром, формируемых на основе псевдослучайных последовательностей (ПСП). Данные ПСП могут быть использованы в качестве синхронизирующих, скремблирующих последовательностей, а также в виде последовательностей, расширяющих спектр передаваемых сигналов для широкополосных радиоканалов [3–5].

При выборе ПСП должны учитываться как их корреляционные функции, так и структурная скрытность, характеризуемая эквивалентной линейной сложностью (ЭЛС) [6–9].

В существующих телекоммуникационных системах применяются М-последовательности (МП), последовательности Голда, малого и большого множеств Касами и др. [10–11].

Значения ЭЛС (степеней проверочных полиномов) перечисленных ПСП с хорошими периодическими корреляционными свойствами приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения ЭЛС псевдослучайных последовательностей

Период ПСП	ЭЛС последовательностей				
	МП	Голда	Малого множества Касами	Большого множества Касами	ГМВП
31	5	10	-	-	-
63	6	12	9	15	12
127	7	14	-	-	-
255	8	16	12	20	32
511	9	18	-	-	27
1023	10	20	15	25	80
2047	11	22	-	-	-
4095	12	24	18	30	192

МП характеризуются одноуровневой периодической автокорреляционной функцией (ПАКФ) при достаточно простой аппаратной реализации в виде регистра сдвига с линейными обратными связями (РС ЛОС). Однако МП обладают сравнительно низкой структурной скрытностью.

Решению задачи повышения ЭЛС ПСП при условии сохранения авто и взаимно-корреляционных свойств посвящено большое количество работ как в нашей стране, так и за рубежом [10, 12–15].

Последовательности Гордона-Миллса-Велча (ГМВП) являются последовательностями, также обладающими рядом с МП одноуровневой ПАКФ, но при этом они обладают более высокой ЭЛС и соответственно более высокой структурной скрытностью [10, 13–14]. Данное свойство определяет приоритетность применения ГМВП в системах связи, навигации и радиолокации, к которым предъявляются жесткие требования по конфиденциальности. Однако широкому применению ГМВП в системах передачи информации препятствует отсутствие практически реализуемых алгоритмов их формирования.

Целью статьи является разработка аппаратной и программной реализации алгоритма формирования ГМВП.

ГМВП формируются над конечными полями с двойным расширением вида  $GF(p^m)^n$ , вследствие чего период данных последовательностей является составным числом, то есть  $N = p^{mn} - 1$ , где  $p$  — характеристика поля,  $m, n$  — натуральные числа. В настоящее время широкое применение получили двоичные ГМВП над полями с двойным расширением вида  $GF(2^m)^n$ . Символы  $d_i$  данных последовательностей с периодом  $N = 2^{mn} - 1$  формируются в соответствии с выражением [8, 14]

$$d_i = \text{tr}_{m,1}[(\text{tr}_{mn,m}(\alpha^i))^r], \quad 1 \leq r < 2^m - 1, \quad (r, 2^m - 1) = 1, \quad (1)$$

где  $\text{tr}_{m,m}(\cdot)$  — след элемента из поля с двойным расширением  $GF(2^m)^n$  в расширенном поле  $GF(2^m)$ ;  $\text{tr}_{m,1}(\cdot)$  — след элемента из расширенного поля  $GF(2^m)$  в простом поле  $GF(2)$ ;  $\alpha \in GF(2^m)^n$  — примитивный элемент поля с двойным расширением. Параметр  $r$  является числом, взаимно простым с порядком мультипликативной группы расширенного поля  $GF(2^m)$ , который равен  $2^m - 1$ .

Эквивалентная линейная сложность двоичных ГМВП определяется выражением [13]

$$l_s = m \cdot n \cdot g(r) \quad (2)$$

где  $g(r)$  — количество единиц в двоичном представлении числа  $r$  в (1).

Отметим, что в табл. 1 для периода  $N = 4095$  приведено максимальное значение ЭЛС ГМВП  $l_s = 192$ , получаемое при значении параметров  $m = 6, n = 2$  и  $r = 31$ . Для других допустимых значений данных параметров ЭЛС может принимать значения  $l_s = 24, 48, 96, 108$ .

Алгоритм формирования ГМВП с периодом  $N = 2^{mn} - 1 = 2^s - 1$  основан на использовании МП с аналогичным периодом и проверочным полиномом  $h_{\text{мп}}(x)$  степени  $s$ , которая называется базисной последовательностью [14, 17]. Одним из корней базисной МП является примитивный элемент  $\alpha$ , принадлежащий расширенному полю  $GF(2^s)$ . Проверочный полином формируемой ГМВП  $h_r(x)$  может быть представлен в виде произведения двух и бо-

лее неприводимых полиномов-сомножителей  $h_{ci}(x)$  степени  $s$ , корни которых являются степенями корней полинома  $h_{mi}(x)$ , то есть степенями примитивного элемента  $\alpha$  и его  $p$ -сопряженных элементов. Число полиномов-сомножителей определяет ЭЛС ГМВП и для заданного периода зависит только от значений параметров  $m, n$  и  $r$ .

Для периодов  $N = 63, 255, 511, 1023$  в табл. 2 приведены полученные в [14, 17] характеристики формируемых ГМВП, включая степени корней полиномов-сомножителей, для заданных примитивных проверочных полиномов  $h_{mi}(x)$  базисных МП. Полиномы базисных МП записаны в двоично-восьмеричном коде по убыванию степени формальной переменной.

В последнем столбце табл. 1 приведены минимальные показатели степени корней полиномов-сомножителей формируемых ГМВП. Распределение корней неприводимых полиномов соответствует таблице полиномов, представленной в [18].

Например, необходимо определить проверочный полином ГМВП с периодом  $N = 1023$  и параметром  $r = 5$ , ЭЛС которой равна  $l_s = 20$ . Корнями полинома базисной МП  $h_{mi}(x)=h_1(x)=x^{10}+x^3+1$  являются элемент  $\alpha$  и его  $p$ -сопряженные элементы. Тогда корнями полиномов-сомножителей будут элементы  $\alpha^5$  и  $\alpha^9$ , и результирующий полином ГМВП равен  $h_{r1}(x)=h_{c1}(x)h_{c2}(x)=h_5(x)h_9(x)=(x^{10}+x^8+x^3+x^2+1) \cdot (x^{10}+x^7+x^5+x^3+x^2+x+1)$ .

Здесь и далее числовой индекс полинома  $h_i(x)$  соответствует минимальному показателю степени корней данного полинома из таблицы неприводимых полиномов [18]. Например, корнем с минимальным показателем степени

для полинома  $h_{23}(x)$  будет элемент  $\alpha^{23}$ , принадлежащий расширенному полю  $GF(2^{10})$ . Другими корнями данного полинома являются его  $p$ -сопряженные элементы:  $\alpha^{46}, \alpha^{92}, \alpha^{184}, \alpha^{368}, \alpha^{736}, \alpha^{449}, \alpha^{898}, \alpha^{773}, \alpha^{523}$ .

Структура проверочного полинома ГМВП  $h_r(x)$ , представляющего собой для конечных полей  $GF(p^s)$  произведение двух или более неприводимых полиномов  $h_{ci}(x)$  степени  $s$ , определяет возможность построения устройства формирования в виде совокупности нескольких РС ЛОС.

Устройство формирования представляет собой два или более РС ЛОС, число ячеек (триггеров)  $T_i$  в каждом из которых равно  $s$ , то есть степени полиномов  $h_{ci}(x)$ , а сумматоры по mod 2 расставляются в соответствии с коэффициентами данных полиномов. Выходы РС ЛОС поступают на общий сумматор по mod 2, являющийся выходом устройства.

Количество различных ГМВП (не считая МП) определяется как произведение числа примитивных полиномов в расширенном поле  $GF(2^m)$  на число примитивных полиномов в поле  $GF[(2^m)^n]$  [14]

$$M_r = \left( \frac{\varphi(2^m - 1)}{m} - 1 \right) \cdot \frac{\varphi(2^{mn} - 1)}{mn},$$

где  $\varphi(a)$  — функция Эйлера, равная числу чисел, взаимно простых с числом  $a$ , в ряду от 1 до  $(a - 1)$ .

При значении  $n = 2$  МП и ГМВП могут быть представлены в виде матрицы размерности  $[(2^m - 1) \times (2^m + 1)]$ , в кото-

Таблица 2

Основные параметры базисных МП и ГМВП

Период $N$	Параметры $m, n$ в поле $GF[(2^m)^n]$	Полином базисной МП $h_{mi}(x)=x^{mm}+\dots+1$	ЭЛС МП	Параметр $r$	Значение функции $g(r)$	ЭЛС ГМВП $l_s$	Число сомножителей в $h_r(x)$	Степени корней полиномов-сомножителей
63=7·9	3, 2	$h_1(x)=x^6+x+1$ 1000011 103	6	3	2	12	2	3, 5
255=15·17	4, 2	435	8	7	3	32	4	7, 11, 13, 37
511=7·73	3, 3	1021	9	3	2	27	3	3, 5, 17
1023=31·33	5, 2	2011	10	3	2	20	2	3, 17
1023=31·33	5, 2	2011	10	5	2	20	2	5, 9
1023=31·33	5, 2	2011	10	7	3	40	4	7, 19, 25, 69
1023=31·33	5, 2	2011	10	11	3	40	4	11, 13, 21, 73
1023=31·33	5, 2	2011	10	15	4	80	8	15, 23, 27, 29, 77, 85, 89, 147

рой число строк равно периоду  $J=2^m - 1$  более короткой МП, называемой характеристической последовательностью.

При построении устройств формирования ГМВП необходимо определить начальные состояния регистров сдвига. В соответствии с результатами, полученными в [14], для их определения требуется найти начало М-последовательности в соответствии с выражением  $d_i = \text{tr}_{s,1}(\alpha^i)$ ,  $i = 0, 1, \dots, N-1$ , получаемым из (1) при  $r = 1$  [8, 14], то есть определить несколько начальных символов  $d_0, d_1, \dots, d_{s-1}$ .

Одним из способов решения данной задачи является использование свойства примитивных полиномов, которое заключается в том, что для конечных полей характеристики  $p = 2$  значение функции следа  $\text{tr}_{s,1} \alpha^1$  равно значению коэффициента при  $(s-1)$ -й степени переменной  $x$  полинома  $h_{\text{mn}}(x)$ , а значение функции следа  $\text{tr}_{s,1} \alpha^{-1}$  — значению коэффициента при первой степени переменной  $x$ .

Для рассматриваемого примитивного полинома  $h_{\text{mn}}(x) = h_1(x) = x^{10} + x^3 + 1$  функции следа  $\text{tr}_{10,1} \alpha^1 = 0$ ,  $\text{tr}_{10,1} \alpha^{-1} = 0$ . Тогда для символа  $d_1$  МП должно выполняться условие: сумма символов последовательности с номерами 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256 и 512 равна нулю. Процедура вычисления суммы проводится последовательно для каждого символа МП при произвольном начальном состоянии. В результате определяется начало МП, то есть первые  $s$  символов с  $d_0$  по  $d_{s-1}$ : 0000000100. Остальные символы базисной МП вычисляются в соответствии с выражением

$$d_{s+i} = d_{0+i} + d_{3+i}, i = 0, 1, \dots, N-s-1. \quad (3)$$

Вычисленные в соответствии с алгоритмом определения начальных состояний регистров сдвига, разработанным в [14], начальные символы базисных МП, проверочные полиномы которых имеют корень  $\alpha^1$ , для периодов  $N = 31, 63, 255, 511, 1023$  представлены в табл. 3

Таблица 3

Начальные символы базисных МП

Период $N$ МП	31	63	255	511	1023
Начальные символы МП	10010	000001	00000100	100001000	0000000100

Аппаратную реализацию алгоритма рассмотрим на примере формирования ГМВП с периодом  $N = 1023$  и ЭЛС  $l_s = 20$  для произвольной базисной МП.

Шаг 1. Формируем символы  $d_i$  МП с периодом  $N = 1023$  с проверочным полиномом  $h_{\text{mn}}(x) = h_1(x) = x^{10} + x^3 + 1$  с корнем  $\alpha^1$  в соответствии с выражением (3) и начальным состоянием из табл. 3. Данная МП представляется в виде матрицы размерности  $[31 \times 33]$

$$F_{\text{МП}} = \begin{bmatrix} 000000010000001001000100000110010 \\ 011010000100101010000111101011101 \\ 01101011000000001100000110110011 \\ 00001010110101100011011111000010 \\ 00111100111101101101000000101000 \\ 0101101010100001111101111001001011 \\ 000001001100100010100011011011100 \\ 00001111000111011011111100100001100 \\ 010110111010000110101011001111001 \\ 011011001000001000100100110000001 \\ 011000101001110110011100010111111 \\ 010100010111011010010000110011011 \\ 010100000111010011110100110101001 \\ 001110000011111001110011011110100 \\ 01010101101111000010011101000111 \\ 010111110110100100001000010100101 \\ 011000111001111111011000010001101 \\ 001110010011110000110111011000110 \\ 001110111101001001010000011010 \\ 001100101110100101101000100010110 \\ 011010010100100011000011101101111 \\ 000001011100101011100111011101110 \\ 011001110101011101111011001010001 \\ 001101100010000111001011111001010 \\ 011001100101010100111111001100011 \\ 010111100110101101001100010010111 \\ 00001011110101010101111111010000 \\ 01010100101111000010101110110101 \\ 0011011100100011100011111111000 \\ 0000111000011111110111000100111110 \\ 001100111110101100101100100100100 \end{bmatrix}$$

Шаг 2. В качестве проверочного полинома произвольной базисной МП выберем примитивный полином  $h_{\text{mn}}(x) = h_{23}(x) = x^{10} + x^4 + x^3 + x + 1$  с корнем  $\alpha^{23}$ . Из двух допустимых значений параметра  $r$  в табл. 2 выберем значение  $r = 3$ .

Шаг 3. В соответствии с табл. 2 проверочный полином ГМВП  $h_r(x) = h_{c_1}(x) h_{c_2}(x)$  является произведением двух сомножителей с корнями, степени которых являются 3-ми и 17-ми степенями корней полинома базисной МП:  $\alpha^{23 \cdot 3} = \alpha^{69}$  и  $\alpha^{23 \cdot 17} = \alpha^{391}$ . Для полинома  $h_{c_2}(x)$  корнем с минимальным показателем степени является  $p$ -сопряженный элемент для элемента  $\alpha^{391}$ , то есть  $\alpha^{59}$ . Таким образом, сомножителями  $h_r(x)$  являются полиномы  $h_{c_1}(x) = h_{69}(x) = x^{10} + x^8 + x^7 + x^6 + 1$  и  $h_{c_2}(x) = h_{59}(x) = x^{10} + x^9 + x^8 + x^5 + x^4 + x^3 + 1$ .

Шаг 4. Символы базисной МП  $c_i$  ( $i = 0, \dots, 1022$ ) с  $h_{\text{mn}}(x) = h_{23}(x)$  формируются путем децимации символов  $d_i$  МП с  $h_{\text{mn}}(x) = h_1(x)$ , полученных в соответствии с выражением (3), по индексу децимации  $i_{d_1} = 23$ . Номера символов вычисляются по mod 1023:  $c_i = d_{23i \bmod 1023}$ .

Шаг 5. Начальное состояние регистра сдвига, то есть первые 10 символов последовательности с  $h_{c_1}(x) = h_{69}(x)$ , формируются путем децимации символов МП с  $h_{\text{mn}}(x) = h_{23}(x)$  по индексу децимации  $i_{d_2} = 3$  или путем децимации символов МП с  $h_{\text{mn}}(x) = h_1(x)$  по двойному индексу децимации  $i_{d_3} = i_{d_1} \cdot i_{d_2} = 23 \cdot 3 \bmod 1023 = 69 \bmod 1023$ .

Шаг 6. Начальное состояние регистра сдвига, то есть первые 10 символов последовательности с  $h_{c_2}(x) = h_{59}(x)$ , формируются путем децимации символов МП с  $h_{\text{mn}}(x) = h_{23}(x)$  по индексу децимации  $i_{d_4} = 17$  или путем децимации символов МП с  $h_{\text{mn}}(x) = h_1(x)$  по двойному индексу децимации

$i_{d5} = i_{d1} \cdot i_{d4} = 23 \cdot 17 \bmod 1023 = 391 \bmod 1023$  или  $i_{d6} = 59$  с учетом  $p$ -сопряженных элементов.

Шаг 7. Устройство формирования ГМВП представляет собой совокупность двух регистров сдвига, состоящих из десяти ячеек (триггеров) каждый, сумматоры по mod 2 в цепи обратной связи которых расставляются в соответствии с коэффициентами проверочных полиномов  $h_{c1}(x) = h_{69}(x)$  и  $h_{c2}(x) = h_{59}(x)$ . Начальные состояния регистров сдвига определены через символы базисной МП с проверочным полиномом  $h_{mn}(x) = h_1(x) = x^{10} + x^3 + 1$ . Символы с выходов регистров поступают на сумматор по mod, являющийся выходом устройства.

Структурная схема устройства формирования ГМВП с вычисленными начальными состояниями регистров сдвига показана на рисунке.

Выходная ГМВП также может быть представлена в виде матрицы размерности  $[31 \times 33]$

$$F_{\Gamma} = \begin{bmatrix} 01111111010101010011101100110011 \\ 00001010110011110100101100011110 \\ 010000010011011001111001011011101 \\ 00110000110011010000001010101000 \\ 001101010000011001001010001110010 \\ 011111110000011001110011011110111 \\ 000011100101000111100101101000110 \\ 000000001010110011101110111000100 \\ 00001011001101100100000001011000 \\ 010000011001101010010111100011001 \\ 00111011111101101000001011110000 \\ 011101001001110011011101101101011 \\ 010001001111110100110010000000111 \\ 011110101100110100111000000101101 \\ 010001000101000111011100111000011 \\ 011100011111101101111000001110101 \\ 000001011100101101001011011011010 \\ 01001010000000000111001010000101 \\ 01110001010101110010110110110001 \\ 00001110111110100001011010000010 \\ 000010111001101010101110110011100 \\ 0100101010110011010111101000001 \\ 011110100110000111010110111101001 \\ 010011110110011110011100110011011 \\ 00110000011000011110111101101100 \\ 00111110001100000001010000101010 \\ 00111110100111001110010011101110 \\ 001101011010101010100100110110110 \\ 011101000011000000110011010101111 \\ 01001111100101101110010001011111 \\ 00111011010101111010111100110100 \end{bmatrix}$$

Программную реализацию алгоритма также рассмотрим на примере формирования ГМВП с периодом  $N=1023$  и ЭЛС  $l_s=20$  для базисной МП с примитивным полиномом  $h_{mn}(x) = h_{23}(x) = x^{10} + x^4 + x^3 + x + 1$ .

При программной реализации алгоритма первые четыре шага совпадают с аппаратной реализацией. Продолжим непосредственно со следующего шага.

Шаг 5. Символы  $f_i$  ( $i=0, \dots, 340$ ) последовательности с периодом  $N=341$  с проверочным полиномом  $h_{c1}(x) = h_{69}(x)$  формируются путем децимации символов МП с  $h_{mn}(x) = h_{23}(x)$  по индексу децимации  $i_{d2} = 3$  или путем

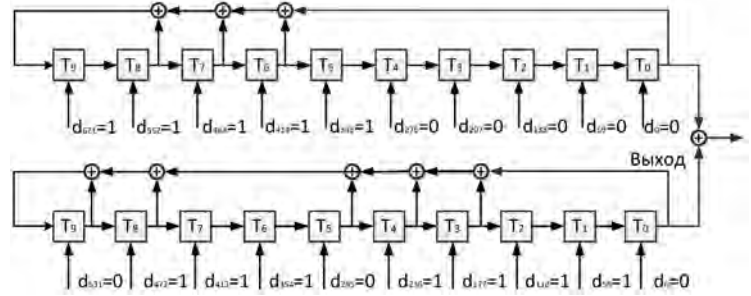


Рис. Устройство формирования ГМВП на основе базисной МП с  $h_{mn}(x) = h_{23}(x) = x^{10} + x^4 + x^3 + x + 1$

децимации символов МП с  $h_{mn}(x) = h_1(x)$  по двойному индексу децимации  $i_{d3} = i_{d1} \cdot i_{d2} = 23 \cdot 3 \bmod 1023 = 69 \bmod 1023$

$$f_i = c_{3i \bmod 1023} = d_{69i \bmod 1023}$$

Шаг 6. Символы  $g_i$  ( $i=0, \dots, 1023$ ) последовательности с периодом  $N=1023$  с  $h_{c2}(x) = h_{59}(x)$ , формируются путем децимации символов МП с  $h_{mn}(x) = h_{23}(x)$  по индексу децимации  $i_{d4} = 17$  или путем децимации символов МП с  $h_{mn}(x) = h_1(x)$  по двойному индексу децимации  $i_{d5} = i_{d1} \cdot i_{d4} = 23 \cdot 17 \bmod 1023 = 391 \bmod 1023$  или  $i_{d5} = 59$ .

$$g_i = c_{17i \bmod 1023} = d_{59i \bmod 1023}$$

Шаг 7. Искомая ГМВП формируется путем суммирования символов  $f_i$  и  $g_i$  ( $i=0, \dots, 1022$ ) двух последовательностей, одна из которых является МП, а другая ПСП с периодом  $N=341$ . Отметим, что при суммировании формируется три периода ПСП с периодом  $N=341$ .

Достоинством аппаратной реализации алгоритма формирования ГМВП является необходимость вычисления только начальных состояний регистров сдвига (по  $s$  символов на каждый регистр). К недостаткам можно отнести требование наличия полного перечня неприводимых полиномов в полях с двойным расширением  $GF[(2^m)^n]$ , которые необходимы для расстановки сумматоров по mod 2 в цепи обратной связи регистров сдвига. Данный недостаток может проявляться при формировании МП и ГМВП с периодами, превышающими значение  $2^{16}-1$ , так как в [18] для данных степеней приведены неполные таблицы неприводимых полиномов.

Достоинством программной реализации алгоритма формирования является то, что в данном случае не требуется наличие полного перечня неприводимых полиномов для сверхдлинных периодов ПСП. Достаточно знание одного примитивного полинома с корнем  $\alpha^1$ , при этом символы искомых ГМВП формируются путем однократной или

двойной децимации символов базовой МП с проверочным полиномом  $h_{\text{мп}}(x) = h_1(x)$  для периода  $N = 2^s - 1$ .

Аппаратная и программная реализации алгоритмов формирования ГМВП сравнимы по сложности с реализацией алгоритма формированием МП и могут быть использованы при разработке перспективных систем управления, навигации и связи, к которым предъявляются повышенные требования по конфиденциальности.

Также полученные результаты могут найти применение при разработке методов формирования других классов псевдослучайных последовательностей, допускающих аналитическое представление в конечных полях.

### Литературы

1. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение: пер. с англ. Изд. 2-е, испр. М.: Вильямс, 2003. 1104 с.
2. Ипатов В. П. Широкополосные системы и кодовое разделение сигналов. Принципы и приложения: пер. с англ. / под ред. В. П. Ипатова. М.: Техносфера, 2007. 488 с.
3. Wang E., Zhang Sh., Hu Q. GPS Correlator Research and FPGA Implementation // Journal of System Simulation. 2008. Vol. 20. Pp. 3582–3585.
4. Вишневецкий В. М., Ляхов А. И., Портной С. Л., Шахнович И. В. Широкополосные беспроводные сети передачи информации. М.: Техносфера, 2005. 592 с.
5. CDMA: прошлое, настоящее, будущее / под ред. Л. Е. Варакина и Ю. С. Шинакова. М.: МАС, 2003. 608 с.
6. Golomb S. W. Two-valued sequences with perfect periodic autocorrelation // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. March 1992. Vol. 28. No. 2. Pp. 383–386.
7. Прозоров Д. Е., Смирнов А. В., Баланов М. Ю. Алгоритм быстрой кодовой синхронизации шумоподобных сигналов, построенных на последовательностях повышенной структурной сложности // Вестник РГРТУ. Серия Радиотехника, радиолокация и системы связи. 2015. № 1 (51). С. 3–9.
8. Ипатов В. П. Периодические дискретные сигналы с оптимальными корреляционными свойствами. М.: Радио и связь, 1992. 152 с.
9. Golomb S. W., Gong G. Signal Design for Good Correlation for Wireless Communication, Cryptography and Radar. Cambridge University Press. 2005. 438 p.
10. Юдачев С. С., Калмыков В. В. Ансамбли последовательностей GMW для систем с кодовым разделением каналов // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2012. № 1. URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=17650851> (дата обращения 13.09.2017).
11. Yang L. L., Hanzo L. Acquisition of m-sequences using recursive soft sequential estimation // Wireless Communications and Networking. 2003. Vol. 1. Pp. 683–687.
12. Cho Ch. M., Kim J. Y., No J. S. New p-ary sequence families of period  $(p^n - 1)/2$  with good correlation property using two decimated m-sequences // IEICE Transactions on Communications. 2015. Vol. E98. No. 7. Pp. 1268–1275.
13. No J. S. Generalization of GMW sequences and No sequences // IEEE Transactions on Information Theory. 1996. Vol. 42. No. 1. Pp. 260–262.
14. Стародубцев В. Г. Формирование последовательностей Гордона-Миллса-Велча на основе регистров сдвига // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58. № 6. С. 451–457.
15. Стародубцев В. Г., Чернявских А. Е. Формирование троичных последовательностей Гордона-Миллса-Велча на основе регистров сдвига // Известия вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59. № 3. С. 202–210.
16. Chung H., No J. S. Linear span of extended sequences and cascaded GMW sequences // IEEE Transactions on Information Theory. 1999. Vol. 45. No. 6. Pp. 2060–2065.
17. Стародубцев В. Г., Попов А. М. Последовательности Гордона-Миллса-Велча с периодом  $N = 1023$  // Известия вузов. Приборостроение. 2017. Т. 60. № 4. С. 318–330.
18. Питерсон У., Уэлдон Э. Коды, исправляющие ошибки: пер. с англ. / под ред. Р. Л. Добрушина и С. И. Самойленко. М.: Мир, 1976. 594 с.



## HARDWARE AND SOFTWARE REALIZATION OF ALGORITHM OF FORMATION OF GORDON-MILLS-WELCH SEQUENCES

**VIKTOR G. STARODUBTSEV,**

St-Petersburg, Russia, vgstarod@mail.ru

**VASILY V. MYSHKO,**

St-Petersburg, Russia, vasvasmishko@mail.ru

**VLADIMIR V. TKACHENKO,**

St-Petersburg, Russia, vik\_hohol@mail.ru

### ABSTRACT

The use of broadband signals based on pseudorandom sequences with good correlation properties and high structural secrecy is one of the ways of increasing the reliability of transmission and processing of the measuring information space means included in the control system, navigation and communication, which meet high requirements on confidentiality. The usefulness of the sequences of Gordon-Mills-Welch (GMW) is determined by their higher structural secrecy in comparison with M-sequences that have single-level periodic autocorrelation function. The lack of practically implemented algorithms of formation of GMW sequences prevents their wide application in systems of information transfer. The purpose of the work is the development of hardware and software implementations of the algorithms of formation of GMV-sequences. Mathematical apparatus of the theory of signals and the theory of finite fields is used in conducting research used. GMW-sequences are formed based on the basic M-sequences. The distribution of the roots of the factors of the verification polynomial GMW-sequences formed on the basis of arbitrary base M-sequences obtained in the research. The distribution of the roots allows to uniquely determine the initial state of the shift registers through the symbols of the basic M-sequence. Examples of realization of algorithm of formation of GMW-sequences with period  $N=1023$  as the basis of a set of shift registers with linear feedback, and through software calculation of symbols of the sought sequence is given in this article. Double decimation of the symbols of the initial state and the current symbol of the sequence, taking into account the exponents of the roots of the test polynomials, used in the software implementation of the algorithm of formation of GMW-sequences. The obtained results allow the use of GMW-sequences instead of M-sequences in the transmission systems for wideband radio channels with high requirements for confidentiality. Equivalent linear complexity of GMW-sequences for 3 - 6 dB higher than the values for M-sequences. With increasing period the win for equivalent linear complexity increases. The algorithm can be used

**KEYWORDS:** pseudorandom sequences; finite fields; indivisible and primitive polynomials; correlation function; equivalent linear complexity; shift registers.

to develop methods for the formation of other classes of pseudorandom sequences, allowing for analytical representation in finite fields.

### REFERENCES

1. Sklar B. *Digital Communications: Fundamentals and Applications*. 2 ed. New Jersey: Prentice Hall, 2001. 1079 p.
2. Ipatov V.P. *Spread Spectrum and CDMA. Principles and Applications*. New York: John Wiley and Sons Ltd. 2005. 400 p.
3. Wang E., Zhang Sh., Hu Q. GPS Correlator Research and FPGA Implementation. *Journal of System Simulation*. 2008. Vol. 20. Pp. 3582- 3585.
4. Vishnevskij V.M., Lyahov A.I., Portnoj S.L., Shahnovich I.V. *Shirokopolosnye bespro-vodnye seti peredachi informacii* [Broadband wireless data transmission network]. Moscow: Tekhnosfera, 2005. 592 p. (In Russian)
5. Varakin L.E., Shinakov Yu.S. (Eds.). *CDMA: proshloe, nastoyashchee, budushchee* [CDMA: Past, Present, Future]. Moscow: MAS, 2003. 608 p. (In Russian)
6. Golomb S.W. Two-valued sequences with perfect periodic autocorrelation. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 1992. Vol. 28. No. 2. Pp. 383-386.
7. Prozorov D.E., Smirnov A.V., Balanov M.Yu. Algorithm fast code synchronization noise-like signals, constructed on an elevated structural complexity sequences. *Vestnik of Ryazan state radioengineering university*. 2015. Vol. 51. Vol. 1. Pp. 3-9. (In Russian)
8. Ipatov V.P. *Periodicheskie diskretnye signaly s optimal'nymi korrelyacionnymi svoystvami* [Periodic discrete signals with optimum correlation properties]. Moscow, Radio and Communications, 1992. 152 p. (In Russian)
9. Golomb S.W., Gong G. *Signal Design for Good Correlation for Wireless Communication, Cryptography and Radar*. Cambridge University Press. 2005. 438 p.
10. Yudachev S.S., Kalmykov V.V. Ansambli posledovatel'nostej GMW dlya sistem s kodovym razdeleniem kanalov [Ensemble GMW se-

quences for systems with CDMA]. *Science and education: electronic scientific and technical publication*. 2012. No. 1. URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=17650851> (date of access 13.01.2017). (In Russian)

11. Yang L.L., Hanzo L. Acquisition of m-sequences using recursive soft sequential estimation. *Wireless Communications and Networking*. 2003. Vol. 1. Pp. 683-687.

12. Cho Ch.M., Kim J.Y., No J.S. New p-ary sequence families of period  $(p^n-1)/2$  with good correlation property using two decimated m-sequences. *IEICE Transactions on Communications*. 2015. Vol. E98. No. 7. Pp. 1268-1275.

13. No J.S. Generalization of GMW sequences and No sequences. *IEEE Transactions on Information Theory*. 1996. Vol. 42. No. 1. Pp. 260-262.

14. Starodubtsev V.G. Forming of Gordon-Mills-Welch sequences on the basis of the shift registers. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie* [Journal of Instrument Engineering]. 2015. Vol. 58. No. 6. Pp. 451-457. (In Russian)

15. Starodubtsev V.G., Chernyavskikh A.E. Generation of ternary Gordon-Mills-Welch sequences on the basis of shift registers. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie* [Journal of Instrument Engineering]. 2016. Vol. 59. No. 3. Pp. 202-210. (In Russian)

16. Chung H., No J.S. Linear span of extended sequences and cascaded GMW sequences. *IEEE Transactions on Information Theory*. 1999. Vol. 45. No. 6. Pp. 2060-2065.

17. Starodubtsev V.G., Popov A.M. Gordon-Mills-Welch sequences with a period of  $N = 1023$ . *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie* [Journal of Instrument Engineering]. 2017. Vol. 60. No. 4. Pp. 318-330 (In Russian)

18. Peterson W.W., Weldon E.J. *Error-correcting codes*. 2nd edition. MIT Press: Cambridge, Mass., 1972. 694 p.

19. Peterson W.W., Weldon E.J. *Error-correcting codes*. 2nd edition. MIT Press: Cambridge, Mass., 1972. 694 p.

**INFORMATION ABOUT AUTHORS:**

Starodubtsev V.G., PhD, Docent, Associate Professor of the Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics;

Myshko V.V., PhD, Docent, Associate Professor of the Military Space Academy;

Tkachenko V.V., PhD, Lecturer of the Military Space Academy.

**For citation:** Starodubtsev V.G., Myshko V.V., Tkachenko V.V. Hardware and software realization of algorithm of formation of Gordon-Mills-Welch sequences. *H&ES Research*. 2018. Vol. 10. No. 3. Pp. 13-20. doi: 10.24411/2409-5419-2018-10071 (In Russian)



doi: 10.24411/2409-5419-2018-10072

# МЕТОДИКА ОЦЕНИВАНИЯ КАЧЕСТВА ВЫПОЛНЕНИЯ ОПЕРАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПОДГОТОВКИ И ПУСКА РАКЕТ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ ПРИ ВОЗНИКНОВЕНИИ НЕШТАТНОЙ СИТУАЦИИ

**ЧИКУРОВ**

**Виталий Александрович<sup>1</sup>**

**АЛЕЙНИК**

**Виталий Валерьевич<sup>2</sup>**

**СПИЧКИНА**

**Дарья Романовна<sup>3</sup>**

## **Сведения об авторах:**

<sup>1</sup>к.т.н., доцент, начальник кафедры технологий и средств автоматизации обработки и анализа информации космических средств Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского, г. Санкт-Петербург, Россия, chikurov69@bk.ru

<sup>2</sup>к.в.н., доцент, начальник факультета автоматизированных систем управления войсками Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского, г. Санкт-Петербург, Россия, chikurov69@bk.ru

<sup>3</sup>курсант кафедры технологий и средств автоматизации обработки и анализа информации космических средств Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского, г. Санкт-Петербург, Россия, darspichkina@yandex.ru

## **АННОТАЦИЯ**

В системе Вооруженных Сил России важную роль играют Космические войска, решающие задачи: информационного обеспечения действий Вооруженных Сил, эффективного обеспечения управления войсками и оружием и ведения боевых действий в космосе и из космоса.

Успешное решение данных задач предполагает безусловное выполнение требований к уровню боевой готовности космических средств. Подобные требования предъявляются к боевым расчетам космодрома, участвующих на этапе подготовки и пуска ракеты космического назначения. При этом, временные задержки и ошибки в управлении, вызванные неверным решением задачи анализа состояний и выдачи управляющих воздействий могут привести к необратимым негативным последствиям – срыву целевой задачи, отказам, различным по своим последствиям авариям и даже катастрофам. Качество системы информационного обеспечения в значительной мере определяется уровнем автоматизации задач контроля выполнения технологических операций. Повышение эффективности функционирования системы информационного обеспечения тесно связано с унификацией программных средств оценивания состояния и управления ракет космического назначения.

Анализ практики летных испытаний показал, что нештатные ситуации присущи всем типам изделий, их повторяемость минимальна, интерпретация сложна, а ущерб значителен. При этом операции контроля и наглядность представления хода выполнения технологического графика слабо автоматизированы.

В условиях повышения требований к оперативности получения результатов выполнения технологических графиков, к качеству выполнения операций, возникает острая потребность в разработке специального программного обеспечения, которое бы позволило с учетом изменения обстановки в реальном масштабе времени контролировать технологию подготовки и пуска ракет космического назначения.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** технологический график; нештатная ситуация; ракета космического назначения; критический путь; интегральный показатель качества; технология подготовки и пуска.

**Для цитирования:** Чикуров В.А., Алейник В.В., Спичкина Д.Р. Методика оценивания качества выполнения операций технологического процесса подготовки и пуска ракет космического назначения при возникновении нештатной ситуации // Научно-технические исследования в космических исследованиях Земли. 2018. Т. 10. № 3. С. 21–29. doi: 10.24411/2409-5419-2018-10072

Главной целью Космических войск является обеспечение гарантированного доступа и необходимого присутствия России в космосе при сохранении ведущих позиций Российской Федерации в космических полетах и безусловном выполнении международных обязательств в области космической деятельности. При этом, для достижения этой цели предусматривается решение таких основных задач, как развертывание и поддержание необходимого для решения целевых задач состава орбитальных группировок отечественных космических аппаратов, обеспечение создания перспективных и модернизация существующих средств выведения и управления космическими аппаратами; создание научно-технического и технологического задела для разработки перспективных образцов ракетно-космической техники и др.

В настоящее время решение названных задач невозможно без наличия интегрированных автоматизированных информационно-управляющих систем на всех этапах жизненного цикла космических средств (КС) и объектов наземной космической инфраструктуры (НКИ) (проектирование, производство, испытания и эксплуатация). А в особенности на этапах транспортировки, приемки, хранения, сборки, подготовки и пуска КС, измерения параметров движения РКН на участке выведения, приема и обработки измерительной информации о функционировании систем РКН и КА в полете, отвечающих современным требованиям развития информационных технологий.

Глобальный характер и сложность задач, возлагаемых на КС — средства выведения, орбитальные средства, а также средства НКИ, — обусловили резкое возрастание объемов информации, поступающей в центры управления полетами средствами выведения и КА, усиление «жесткости» временных и других ресурсных ограничений на процесс принятия решений при одновременном сокращении расходов на разработку обеспечивающих выполнение этих задач средств и наблюдающейся деградации структуры наземного автоматизированного комплекса управления и АСУ. Для того, чтобы в этих условиях эффективность применения КС не только не снижалась, а при некоторых условиях и возрастала, необходимо резко повысить качество всех подсистем АСУ КС.

На первом Государственном испытательном космодроме Министерства обороны функционирует автоматизированная система комплексного анализа результатов применения космических средств. На эту систему возложены задачи анализа информационно-телеметрического, баллистика-навигационного обеспечения результатов испытаний на этапе подготовки и пуска ракеты-космического назначения (РКН), комплексного оценивания результатов испытаний изделий, включая проведение анализа технико-экономических показателей испытаний; контроля качества работы технологического оборудования старто-

вого комплекса, анализа летно-технических характеристик составных частей РКН.

Процесс принятия решения по выходу из нештатной ситуации (НШС) в общем случае заключается в анализе влияния последствий НШС на возможность продолжения подготовки и пуска РКН, определении содержания и последовательности технологических операций, распределении ресурсов на каждую операцию, коррекции технологического графика подготовки и пуска.

Анализ последствий НШС выявляет техническое состояние наземного технологического оборудования и РКН, время, необходимое для осуществления ремонта, и позволят сделать вывод о целесообразности дальнейшего продолжения работ и возможности осуществить пуск РКН в установленное время [1].

В зависимости от временных ресурсов выполнения технологических операций параллельно с устранением последствий может быть выработано несколько вариантов технологического графика подготовки и пуска. Задачей лица, принимающего решение (ЛПР), является выбор такого варианта, при котором технологический график будет выполнен в жестко отведенные временные рамки.

Существует несколько способов формализованного представления выполняемой совокупности работ, применяемых для целей планирования и управления ими. Широкое распространение при построении моделей систем управления комплексом операций получили графические методы, как наиболее универсальные и дающие обзримую информацию о ходе работ, к основным из которых относятся метод построения линейного графика Гантта и методы, основанные на использовании теории графов, — методы сетевого планирования (рис. 1).

Для разработки сетевых графиков используются методы сетевого моделирования, которые позволяют увязать выполнение различных работ и процессов во времени, получив в результате общую продолжительность всего проекта [2].

Для решения задач планирования технологических операций по подготовке и пуску РКН широко применяется аппарат сетевых моделей (рис. 2), позволяющий обобщить и графически отобразить:

- комплекс планируемых мероприятий и работ;
- структуру комплекса работ и взаимосвязи между его элементами;
- порядок и последовательность мероприятий и работ;
- сроки начала, окончания и продолжительности работ;
- резервы времени.

Для разработки сетевых графиков используются методы сетевого моделирования, которые позволяют увязать выполнение различных работ и процессов во времени, получив в результате общую продолжительность всего проекта.



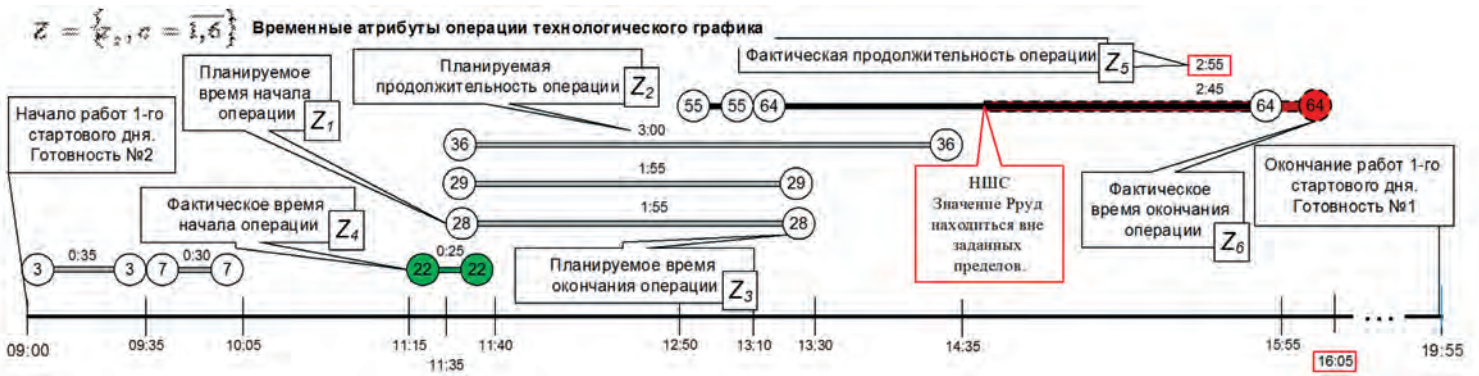


Рис. 1. Пример технологического графика для номера расчета ДУ

Общая продолжительность технологического графика подготовки и пуска зависит от взаимозависимости работ (топологии сетевой модели), от продолжительностей работ и временных ограничений, установленных на сроки работ. Сетевые модели, состоящие из работ, взаимная последовательность и продолжительности которых заданы однозначно, называются детерминированными сетевыми моделями. Увеличение фактической продолжительности критических работ на детерминированной сетевой модели, вызванное какими-либо причинами, приводит к соответствующему увеличению общей продолжительности, в то время как не критические работы обладают некоторыми резервами времени [3].

Наиболее часто на практике используется метод критического пути или сеть СРМ. Модели подобного типа называют сетями, ориентированными на события. В результате использования метода СРМ удается получить и использовать для анализа следующую информацию:

- минимальное время, необходимое для выполнения всего комплекса работ;
- время начала и окончания отдельных операций;
- операции, которые являются «критическими» и должны быть выполнены точно в установленное время, чтобы не сорвать срок выполнения всего комплекса работ;
- время, на которое можно отложить срок выполнения «некритической» операции, чтобы она не повлияла на срок выполнения всего комплекса работ [4].

В данной сети введено понятие критического пути — это совокупность технологических операций, определяющих общее время выполнения всего комплекса работ. С использованием данной сети можно определить следующие характеристики технологических операций: наиболее раннее время начала операции, наиболее раннее время окончания операции, наиболее позднее время начала операции, наиболее позднее время окончания операции, критический путь, длину критического пути (время выполнения всего



Рис. 2. Сравнительный анализ сетевых моделей



комплекса работ). Так как, в общем случае, часть работ выполняется параллельно и имеет разную продолжительность, то возможно определение резерва времени для работ, не лежащих на критическом пути. Для работ, лежащих на критическом пути резерв времени отсутствует; любое запаздывание начала работы ведет к увеличению продолжительности всего комплекса работ. Запаздывание в начале работы, не лежащей на критическом пути (при условии, что оно находится в пределах резерва) не ведет к увеличению продолжительности всего комплекса работ [5].

Для решения задач планирования технологических операций по подготовке и пуску РКН широко применяется аппарат сетевых моделей, позволяющий обобщить и графически отобразить:

- комплекс планируемых мероприятий и работ;
- структуру комплекса работ и взаимосвязи между его элементами;
- порядок и последовательность мероприятий и работ;
- сроки начала, окончания и продолжительности работ;
- резервы времени.

Технологическая операция описана нормативно-технической документацией, где основными ее элементами является  $T_{ij}$  — время начала  $j$ -й операции,  $T_{nj}$  — время окончания  $j$ -й операции,  $D_j$  — длительность выполнения  $j$ -й операции. При этом длительность выполнения технологического графика, представляет собой последовательность выполнения технологических операций  $D_\Sigma = \bigcup_{j=0}^N D_j$ . Выполнение  $j$ -го варианта технологического графика на практике может варьироваться при изменении текущей обстановки, длительность технологических операций имеет области пересечений  $D_\Sigma = \bigcap_{j=0}^N D_j$ , а технологический график подлежит коррекции с учетом нормативных требований к длительности  $j$ -го варианта [6].

В общем виде совокупность вариантов выполнения технологического графика подготовки и пуска может быть представлена в виде:

$$R = \langle S, Q, T, D, \varphi \rangle,$$

где  $S = \left\{ S_i / i = \overline{1, N} \right\}$  — множество состояний технологической операции;

$Q = \left\{ Q_j / j = \overline{1, N} \right\}$  — множество операций выполнения  $j$ -го варианта;

$T = \left\{ T_j / j = \overline{1, N} \right\}$  — множество вершин, характеризующих события начала и окончания операций;

$D$  — длительность выполнения технологического графика;

$\varphi: S \times Q \rightarrow D$  — отображение декартового произведения множества состояний технологической операции и множества операций выполнения  $j$ -го варианта на длительность процесса.

Учитывая тот факт, что технологический график состоит из технологических операций, время выполнение которых жестко регламентировано, при возникновении нештатных ситуаций длительность  $j$ -го варианта технологического графика зависит от минимальной, максимальной длительности выполнения  $j$ -й операции.

Таким образом, модель процесса подготовки РКН можно описать как:

$$X = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m X_{ij} (\Pi_{ij}, D_{ij \text{ фак}}, D_{ij \text{ мин}}, T_{ij}),$$

где  $X$  — общее число операций процесса подготовки РКН;

$N$  — число операций технологического графика;

$M$  — число технологических операций процесса подготовки РКН;

$\Pi_{ij}$  — приоритет выполнения операции технологического графика;

$D_{ij \text{ фак}}$  — фактическое время выполнения технологического графика;

$D_{ij \text{ мин}}$  — минимально допустимое время выполнения  $X_{ij}$  операции технологического графика;

$T_{ij}$  — предположительное время выполнения  $X_{ij}$  операции технологического графика [7].

На практике технологические операции могут быть выполнены с резервом времени  $\Delta t_n$ , который появляется за счет завышенных требований, установленных нормативно-технической документацией на РКН, уровня подготовки специалистов, качества выполнения операций и др.

При возникновении НШС выполнение  $X$  операции процесса подготовки РКН связано с определением наиболее низкого уровня приоритета  $\Pi_{ij}$  выполнения операции технологического графика, где проверяются условия:

$$\Delta t_n = t_n - \sum_{i=1}^n D_{ij \text{ мин}} T_{ij} - \sum_{j=1}^m D_{ij \text{ мин}} T_{ij} > 0.$$

Выполнение этих требований позволит оценить качество выполнения технологического графика, характеризующее свойство пригодности РКН к применению по назначению [8].

Наличие и полнота исходных данных пусковой компании, временных ограничений позволит сформулировать некоторую последовательность действий, характеризующих результирующий показатель качества выполнения операций технологического графика подготовки и пуска РКН (см. рис. 3).

На основе этих данных формируется технологический график подготовки и пуска, который зачастую, в случае возникновения НШС, подлежит изменению, если не

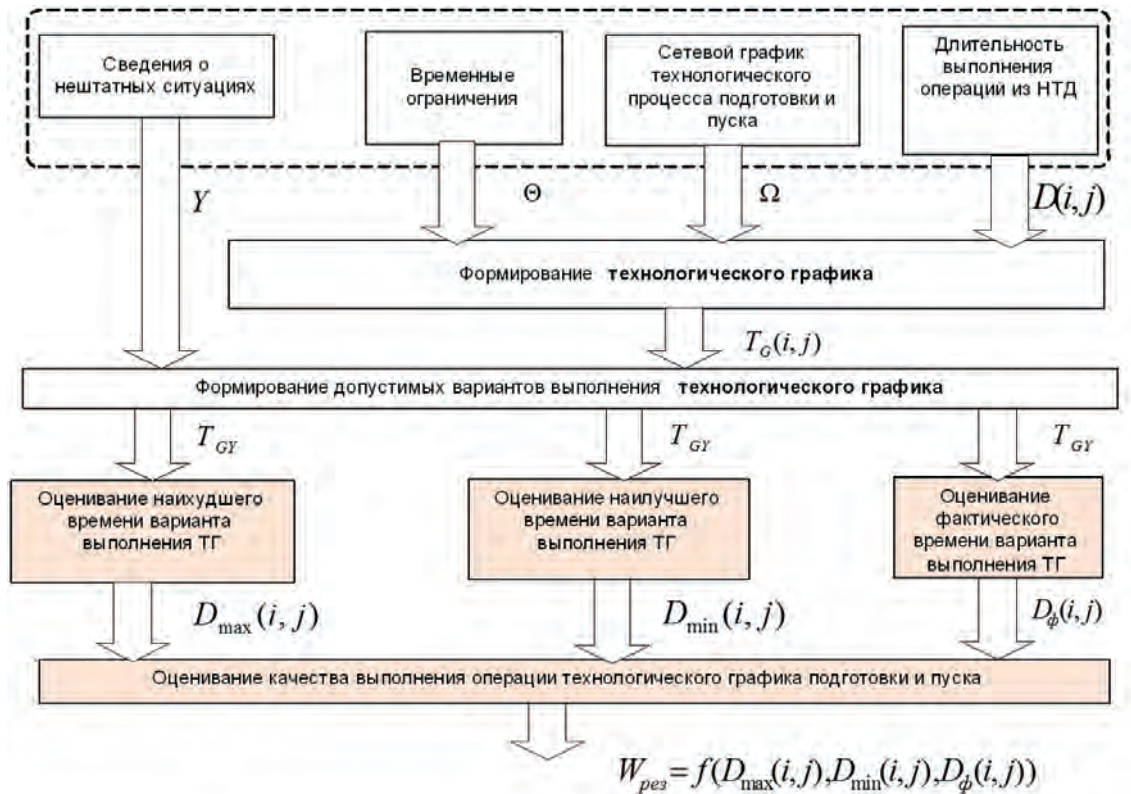


Рис. 3. Схема методики оценивания показателей качества выполнения операций ТГ

принято решение об отмене пуска. Содержание и последовательность дальнейших действий может определяться технологической документацией или вырабатываться с привлечением экспертов [9].

Достижение цели обеспечивается за счет решения задачи выбора состава временных ресурсов, варианта их взаимодействия при выполнении операции технологического графика подготовки и пуска, что позволит получить количественные оценки интегрального показателя качества технологического процесса:

- оценивание наихудшего времени варианта выполнения ТГ  $D_{\max}(i, j)$ ;
- оценивание наилучшего времени варианта выполнения ТГ  $D_{\min}(i, j)$ ;
- оценивание фактического времени варианта выполнения ТГ  $D_{\phi}(i, j)$ ;
- формирования интегрального показателя качества технологического процесса  $W_{рез}$  [10].

Методика оценивания качества выполнения операции технологического процесса подготовки и пуска ракет-космического назначения при возникновении НШС представляет собой следующие этапы выполнения:

1. Подготовка исходных данных (выбор технологического графика, статистика по однотипным пускам, представление ТГ в виде графа).

2. Вычисление раннего времени начала операций  $T_{рн}(i, j)$  и окончания  $T_{ро}(i, j)$  выполнения операций ТГ:

$$T_{рн}(i, j) = T_{к}(i);$$

$$T_{ро}(i, j) = T_{к}(i) + D(i, j);$$

$$T_{к}(i) = \max \left[ T_{к}(i) + D(i, j) \right].$$

3. Вычисление позднего времени начала и окончания выполнения операций ТГ:

$$T_{пн}(i, j) = T_{н}(i) + D(i, j);$$

$$T_{по}(i, j) = T_{н}(i);$$

$$T_{н}(i) = T_{к}(i) \text{ mix } \left[ T_{н}(i) + D(i, j) \right].$$

4. Определение резерва времени на выполнение операций ТГ:

$$\Delta t_i = T_{но}(i, j) - T_{ро}(i, j).$$

5. Вычисление длительности критического  $D_{к}$  пути выполнения операций ТГ с использованием НТД:

$$D_k = \sum D(i, j), \quad \text{если } \Delta t_i = 0.$$

6. Вычисление наиболее вероятного времени выполнения операций с использованием вычисленных значений наилучшего и наихудшего времени выполнения ТГ:

$$T_B(i, j) = \frac{T_{\min}(i, j) + T_{\max}(i, j)}{2}.$$

7. Определение фактической длительности времени на выполнение операций ТГ:

$$D_\phi(i, j) = \frac{T_{\min}(i, j) + 4T_n(i, j) + T_{\max}(i, j)}{6}.$$

8. Выполнение операции 3–6 для определения длительности критического пути  $D_{кф}(i, j)$  с учетом фактического времени выполнения операций  $D_\phi(i, j)$ .

9. Оценивание качества выполнения технологического графика процесса подготовки и пуска, соблюдая неравенство:

$$D_{кф}(i, j) \leq D_k [11].$$

Стоит ввести ряд ограничений, которые требуется учесть при реализации алгоритма и программы построения операций технологического графика (ТГ):

1. Возникновение нештатной операции в ходе выполнения ТГ не приводит к отмене пуска РКН.
2. Выполнение ТГ не имеет тупиковых вершин.
3. Если в момент времени  $t_i$  технологическая операция превышает затраты и условия  $\Delta t_i$  не выполняются, тогда дальнейшее выполнение ТГ невозможно или нецелесообразно.

Алгоритмы оценивания качества выполнения операций и расчета временных параметров ТГ приведен на рис. 4, который предусматривает процедуру автоматизированного расчета временных показателей критического пути, как при плановом выполнении операций ТГ, так и при возникновении нештатной ситуации. При этом предусмотрена процедура формирования нового технологического графика с учетом резерва времени.

Программный модуль, представленный на рис. 5, наглядно показывает, какие операции ТГ планируются к выполнению, какова длительность операций, приоритетность выполнения, а также возможность автоматизированного формирования новых операций. Все это позволит ЛПР оценить качество (своевременность) выполнения всего ТГ в установленные сроки и сделать выводы о возможности выполнении операций в полном объеме [12].

Практическое применение специального программного обеспечения на примере ракеты-носителя «Союз» при выполнении операций заправки позволяет сформировать сетевой график технологических операций, при этом расчет временных показателей, построение критического пути с использованием нормативно-технической документации и статистической информации осуществляется автоматически.

При возникновении НШС, номер дежурного расчета практически сразу получает данные о возможности своевременного завершения всего ТГ, и программа предлагает альтернативный вариант.

Внедрение разработанного специального программного обеспечения позволит повысить обоснованность принимаемых решений по управлению эксплуатацией космических средств с учетом критерия качества (своевременности) выполнения операций ТГ, совершенствовать специальное программное обеспечение, используемое при подготовке и пуске РКН. Все это расширяет возможности

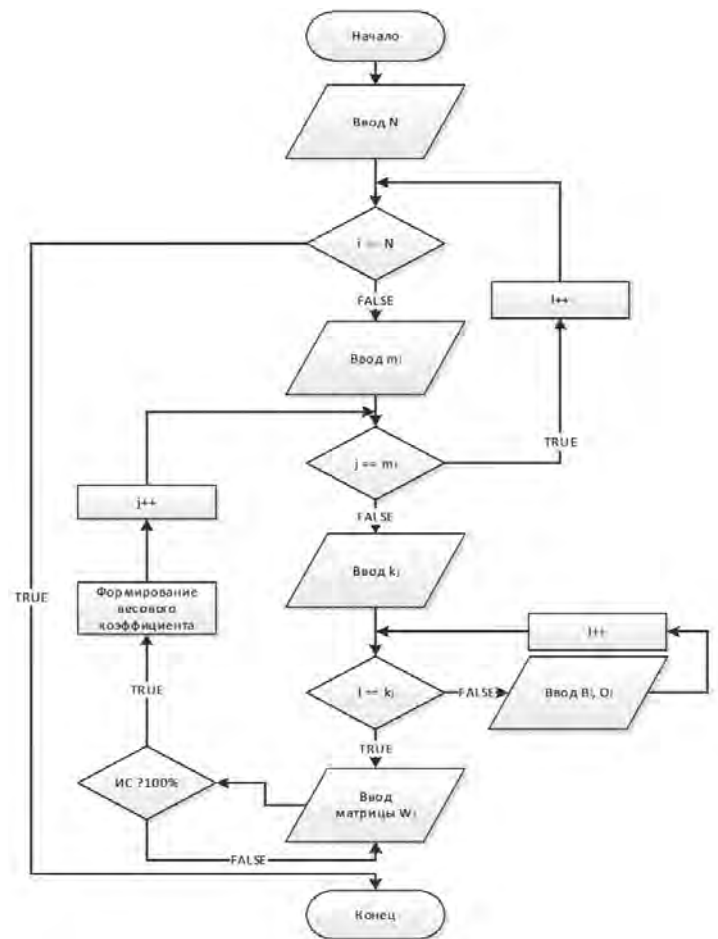


Рис. 4. Структура алгоритма программы расчета временных параметров ТГ

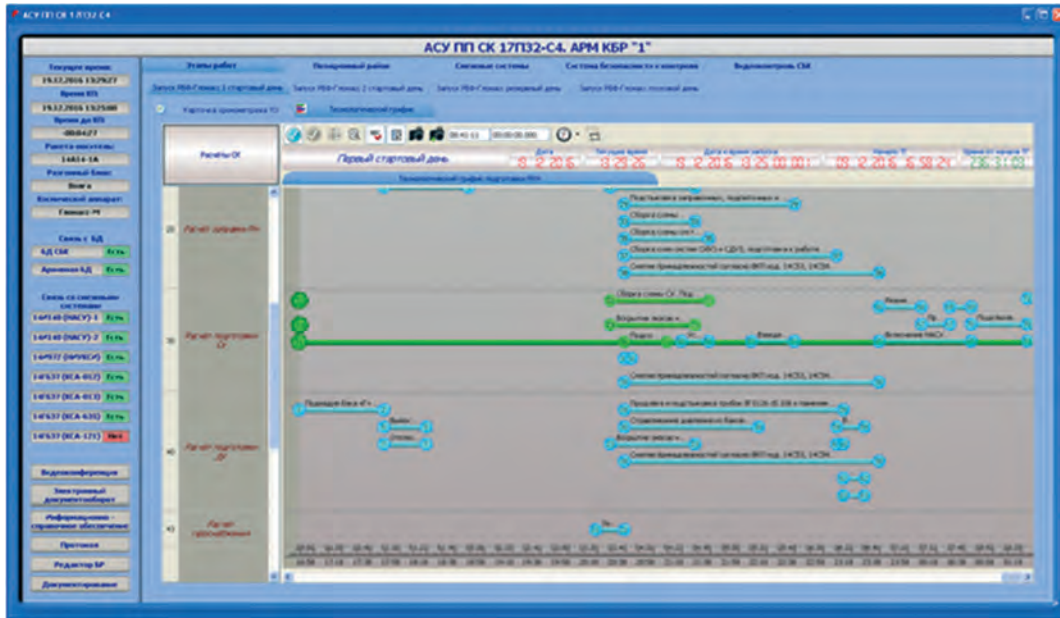


Рис. 5. Форма отображения выполнений операций ТГ

оперативного выявления НШС, автоматизирует процесс выдачи ЛПР предложений по изменению ТГ, повышает оперативность принимаемых решений в зависимости от развития ситуации и уменьшает затраты на коррекцию или создание новых программных средств не требующих участия представителей промышленности [13].

Это позволит оперативно доставлять всю технологическую информацию, необходимую для принятия управленческого решения (в автоматическом или ручном режиме), на более высокие уровни управления и избавиться от субъективного (человеческого) фактора, который зачастую мешает принятию взвешенного, единственно правильного решения при подготовке к пуску и пуске РКН, особенно в нештатных, критических ситуациях [14].

Построение и функционирование автоматизированных систем контроля выполнения операций технологического графика на принципах позволит проводить мониторинг и управление в реальном масштабе времени всеми процессами подготовки и пуска РКН в целом, моделировать отдельные этапы, выявлять критические участки и слабые звенья процессов подготовки и пуска, организовывать доступ к данным, отражающим не только весь процесс подготовки и пуска РКН, но и весь объем конструкторской, эксплуатационно-технической и методической документации, результаты заводских, стендовых, автономных комплексных и летных испытаний РКН, а кроме того, позволит накапливать и использовать опыт персонала, полученный при проектировании, производстве и эксплуатации систем и агрегатов РКН [15].

## Литература

1. Юсупов Р. М., Соколов Б. В., Птушкин А. И., Иконникова А. В., Потрясаев С. А., Цивирко Е. Г. Анализ состояния исследований проблем управления жизненным циклом искусственно созданных объектов // Труды СПИ-ИРАН. 2011. Вып. 1(16). С. 37–109.
2. Кульга К. С. Автоматизация технической подготовки и управления производством на основе PLM-системы. М.: Машиностроение, 2008. 256 с.
3. Суханова А. Ю. «Фундамент для управления жизненным циклом ракетно-космической техники уже создан»: интервью А. Н. Филатова, директора по ИТ (ОАО «РКЦ Прогресс») // CAD/CAM/CAE Observer. 2014. № 8 (92). С. 8–22.
4. Опыт внедрения многоуровневой системы управления производством на ФГУП НПО автоматики им. академика Семихатова. URL: <http://www.mescenter.ru/mesacconf/program10&lang=rus> (дата доступа 19.01.2017).
5. Создание корпоративной информационной системы управления на базе комплекса бизнес-приложений Oracle E-Business Suite. URL: [http://borlas.ru/clients\\_khrunichev.html](http://borlas.ru/clients_khrunichev.html) (дата обращения 19.10.2017).
6. Суханова А. Ю. «PLM не построишь на инициативе снизу»: интервью А. Л. Феоктистова, заместителя генерального конструктора ОАО РКК «Энергия» им. С. П. Королева // CAD/CAM/CAE Observer. 2011 № 7 (67). С. 10–27.
7. Шопин А. Г., Занин И. В., Бурдин А. В. MIS и EMI: информационные системы уровня MES // Автоматизация в промышленности. 2009. № 9. С. 28–34.



8. Дубова Н. PLM на пороге зрелости // Открытые системы. 2011. № 5. С. 26–31.

9. Шмелев В. В. Оптимальное планирование технологического процесса методом динамического программирования // Научное обозрение. 2014. № 12 (часть 3). С. 777-781.

10. Суханова А. Ю. «Мы владеем уникальной методологией нисходящего проектирования»: интервью А. Н. Филагова, директора по ИТ ФГУП ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» // CAD/CAM/CAE Observer. 2010. № 5. (57). С. 10–23.

11. Шмелев В. В. Корпоративная информационная система автоматизированной системы управления подготовкой и пуском ракеты космического назначения // Сборник трудов ВКА имени А. Ф. Можайского. 2015. № 646. С. 29–38.

12. Майданович О. В., Каргин В. А., Мышко В. В., Охтилев М. Ю., Соколов Б. В. Теория и практика построения

автоматизированных систем мониторинга технического состояния космических средств: Монография. СПб.: ВКА имени А. Ф. Можайского, 2011. 219 с.

13. Баранюк В. В. Основные направления создания единого информационного пространства ВС РФ // Военная мысль, 2004. № 11. С. 29–34.

14. Майданович О. В., Охтилев М. Ю., Соколов Б. В., Юсупов Р. М. Комплексная автоматизация мониторинга состояния космических средств на основе интеллектуальных информационных технологий // Информационные технологии. Приложение к журналу. 2011. № 10. С. 1–32.

15. Ахметов Р. Н., Васильев И. Е., Капитонов В. А., Охтилев М. Ю., Соколов Б. В. Концепция создания и применения перспективной АСУ подготовкой и пуском ракеты космического назначения «Союз-2»: новые подходы к интеграции, интеллектуализации, управлению // Авиакосмическое приборостроение. 2015. № 4. С. 3–54.

---

## THE TECHNIQUE FOR ESTIMATING THE QUALITY OF TECHNOLOGIC OPERATIONS OF ROCKET-VEHICLE PREPARATION AND LAUNCH IN CASE OF EMERGENCY SITUATION

**VITALIY A. CHIKUROV,**

Saint-Petersburg, Russia, chikurov69@bk.ru

**VITALY V. ALEINIK,**

Saint-Petersburg, Russia, chikurov69@bk.ru

**DARIA R. SPICHKINA,**

Saint-Petersburg, Russia, darspichkina@yandex.ru

**KEYWORDS:** technological chart; emergency situation; a rocket of space appointment; critical way; integrated indicator of quality; technology of preparation and start-up.

### ABSTRACT

In the system of Armed Forces of Russia, an important role played by Space forces that solve problems of information support of actions of Armed Forces, effective ensuring management of troops and weapon and conducting combat operations in space and from space.

The successful solution of these tasks assumes unconditional implementation of requirements to the level of combat readiness of space means. Similar requirements are imposed to combat crews of the spaceport, involved in a stage of preparation and start-up rocket of space appointment. At the same time, the temporary delays and mistakes in management caused by the incorrect solution of a task of the analysis of conditions and deliveries of the operating influences, can lead to irreversible negative consequences – failure of a

target task, refusals, consequences, various on the, to accidents and even accidents.

The quality of system of information support considerably is defined by the level of automation of problems of control of performance of technological operations. The increase in efficiency of functioning of system of information support is closely connected from unification of software of estimation of a state and management of a rocket of space appointment.

The analysis of practice of flight tests has shown that emergencies situations are inherent in all types of products, their repeatability is minimum, interpretation is difficult, and the damage is considerable. At the same time, operations of control and presentation of



representation of the course of implementation of the technological chart are poorly automated.

In the conditions of increase in requirements to efficiency of obtaining results of implementation of technological schedules, to quality of performance of operations, there is a sharp need for development of the special software that would allow to control in real time taking into account change of a situation technology of preparation and start-up rocket of space appointment.

## REFERENCES

1. Yusupov R.M., Sokolov B.V., Ptushkin A.I., Ikonnikova A.V., Potryasaev S.A., Tsvirko E.G. Research problems analysis of artificial objects lifecycle management. *SPIIRAS Proceedings*. 2011. Vol. (16). Pp. 37-109. (In Russian)
2. Kulga K.S. *Avtomatizatsiya tekhnicheskoy podgotovki i upravleniya proizvodstvom na osnove PLM-sistemy* [Automation of technical training and production management based on PLM-system]. Moscow: Mashinostroenie. 2008. 256 p. (In Russian)
3. Sukhanova A. Yu. "Fundament dlya upravleniya zhiznennym tsiklom raketno-kosmicheskoy tekhniki uzhe sozdan": Interv'y u A.N. Filatova, direktora po IT (Public corporation "RKTs "Progress") ["Foundation for Lifecycle Management rocket and space technology has been created": interview by A.N. Filatova, Director of IT (JSC "RCC" Progress)]. *CAD/CAM/CAE Observer*. 2014. No. 8 (92). Pp. 8-22. (In Russian)
4. Opyt vnedreniya mnogourovnevnoy sistemy upravleniya proizvodstvom na FGUP NPO avtomatiki im. akademika Semikhatova [Skvortsov SB Experience of implementing multilevel production management system for scientific production association named after Academician Semikhatova automation]. URL: <http://www.mescenter.ru/mesacconf/?page=program10&lang=rus> (access date 19.01.2017).
5. *Sozdanie korporativnoy informatsionnoy sistemy upravleniya na baze kompleksa biznes-prilozheniy Oracle E-Business Suite* [Creation of corporate information management system based on complex business applications Oracle E-Business Suite]. URL: [http://borlas.ru/clients\\_khrunichiev.html](http://borlas.ru/clients_khrunichiev.html) (date access 19.10.2017).
6. Sukhanova A. Yu. "PLM ne postroish' na initsiative snizu": Interv'y u A.L. Feoktistova, zamestitelya general'nogo konstruktora OAO RKK "Energiya" im. S.P. Koroleva [Feoklistov AL "PLM can not be built on the initiative from below": interview by A.N. Filatov, Deputy General Designer of OAO RSC Energia. S.P. Korolev]. *CAD/CAM/CAE Observer*. 2011. No. 7 (67). Pp. 10-27. (In Russian)
7. Shopin A.G., Zanin I.V., Burdin A.V. MIS i EMI: informatsionnye sistemy urovnya MES [Shopin AG, Zanin IV, A. Burdin MIS and EMI: information systems level MES]. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti* [Automation in Industry]. 2009. No. 9. Pp. 28-34. (In Russian)
8. Dubova N. PLM na poroge zrelosti [N. Dubov PLM on the threshold of maturity]. *Otkrytye sistemy* [Open systems]. 2011. No. 5. Pp. 26-31. (In Russian)
9. Shmelev V.V. Optimal planning of the technological process by the method of dynamic programming. *Scientific review*. 2014. No. 12. (Part 3). Pp. 777-781. (In Russian)
10. Sukhanova A. Yu. "My vladeem unikal'noy metodologiyey niskhodyashchego proektirovaniya" Interv'y u A.N. Filatova, direktora po IT FGUP GNPRKTs "TsSKB-Progress" ["We own unique methodologies of top-down design" Interview by A.N. Filatova, director of IT FSUE GNPRKTS "TsSKB-Progress"]. *CAD/CAM/CAE Observer*. 2010. No. 5 (57). Pp. 10-23. (In Russian)
11. Shmelev V.V. Korporativnaya informatsionnaya sistema avtomatizirovannoy sistemy upravleniya podgotovkoy i puskom rakety kosmicheskogo naznacheniya. [Corporate information system of an automated control system for preparation and rocket firing of space appointment]. *Trudy voenno-kosmicheskoi akademii imeni A.F. Mozhaiskogo* [Proc. of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky]. 2015. No. 646. Pp. 29-38. (In Russian)
12. Kargin V.A., Mychko V.V., Ohtilev M.Y., Sokolov B.V. Teoriya i praktika postroeniya avtomatizirovannykh sistem monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya kosmicheskikh sredstv. Monografiya. [The theory and practice of creation of the automated systems of monitoring of a technical condition of space means: Monograph] St. Petersburg: VKA imeni A.F. Mozhayskogo Publ., 2011. 219 p. (In Russian)
13. Baranyuk V.V. The main directions of common information space Armed Forces. VV Baranyuk. *Voennaya mysl'* [Military Thought]. 2004. No. 11. Pp. 29-34. (In Russian)
14. Maydanovich O.V., Ohtilev M.Y., Sokolov B.V., Yusupov R.M. Kompleksnaya avtomatizatsiya monitoringa sostoyaniya kosmicheskikh sredstv na osnove intellektual'nykh informatsionnykh tekhnologiy [Complex automation of monitoring of the state of space assets on the basis of intelligent information technologies]. *Informacionnye tehnologii* [Information Technologies]. 2011. No. 10. Pp. 1-32. (In Russian)
15. Ahmetov R.N., Vasiliev I.E., Kapitonov V.A., Ohtilev M.Y., Sokolov B.V. Concept of creation and applying perspective ACS preparation and launch of a space rocket «Soyuz-2»: new approaches to integration, intellectualization and management. *Aerospace Instrument-Making*. 2015. No. 4. Pp. 3-54. (In Russian)

## INFORMATION ABOUT AUTHORS:

- Chikurov V.A., PhD, Docent, Head of the Department of technology and automation of processing and analysis of space vehicles, Military Space Academy;  
 Aleinik V.V., PhD, Docent, Head of Faculty of automated control systems for troops, Military Space Academy.  
 Spichkina D.R., Cadet of the Department of technology and automation of processing and analysis of space vehicles, Military Space Academy.

**For citation:** Chikurov V.A., Aleinik V.V., Spichkina D.R. The technique for estimating the quality of technologic operations of rocket-vehicle preparation and launch in case of emergency situation. *H&ES Research*. 2018. Vol. 10. No. 3. Pp. 21-29. doi: 10.24411/2409-5419-2018-10072 (In Russian)

doi: 10.24411/2409-5419-2018-10073

# ФОРМИРОВАНИЕ КОНЦЕПТУАЛЬНОЙ МОДЕЛИ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ НА ОСНОВЕ СЕМАНТИЧЕСКИХ ШАБЛОНОВ, ИНТЕГРИРОВАННЫХ СО СРЕДОЙ РАЗРАБОТКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СХЕМ

**КУРЧИДИС**

**Виктор Александрович<sup>1</sup>**

**АНИСИМОВ**

**Олег Витальевич<sup>2</sup>**

**ЯЩЕНКО**

**Анатлий Владимирович<sup>3</sup>**

## АННОТАЦИЯ

Предложен подход к построению концептуальной модели радиоэлектронной аппаратуры, особенность которого состоит в том, что осуществляется многоаспектное описание радиоэлектронной аппаратуры в пространстве свойств, определяющих описание аппаратуры в предметных терминах и понятиях естественного языка. Такое представление аппаратуры с точки зрения диагностирования позволяет рассматривать всякий отказ, как нарушение совокупности номинальных свойств аппаратуры. При этом свойства, характеризующие функциональность, параметры, структуру и конструктивные особенности аппаратуры, определяются в терминах и понятиях предметной области. При формализации концептуального представления радиоэлектронной аппаратуры предлагается для представления свойств аппаратуры использовать триплетную форму, которая применяется в семантических сетях. Такой представление свойств выступает основой для представления аппаратуры в виде совокупности семантических шаблонов. Выполнена формализация, которая обеспечивает использование семантических шаблонов для согласования представления радиоэлектронной аппаратуры в понятиях и терминах предметной области с представлением аппаратуры на электрических схемах на основе библиотечных элементов систем автоматизированного проектирования. Предложенный подход к созданию концептуальной модели радиоэлектронной аппаратуры может быть использован в процессе совершенствования существующих или при разработке новых систем информационной поддержки технического диагностирования, которые ориентированы на использование электронного дела изделия в составе системы интегрированной логистической поддержки жизненного цикла изделий. Предложенный подход позволяет на этапе разработки изделия с использованием средств автоматизированного проектирования обеспечить формирование концептуальной модели радиоэлектронной аппаратуры, что принципиально отличает его от существующих подходов к формированию моделей аппаратуры. Данный подход реализован в виде программного модуля, интегрированного со средой разработки Altium Designer. Целесообразность использования предлагаемого подхода подтверждена для компонентов аппаратуры конструктивного уровня ячейка и блок.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** концептуальная модель; семантический шаблон; техническое диагностирование; радиоэлектронная аппаратура; семантическая сеть.

## Сведения об авторах:

<sup>1</sup>д.т.н., профессор, профессор кафедры автоматики и вычислительных средств Ярославского военного училища противовоздушной обороны, г. Ярославль, Россия, idahmer2@yandex.ru

<sup>2</sup>к.т.н., доцент, профессор кафедры автоматики и вычислительных средств Ярославского военного училища противовоздушной обороны, г. Ярославль, Россия, qwaker@inbox.ru

<sup>3</sup>адъюнкт Ярославского высшего военного училища противовоздушной обороны, г. Ярославль, Россия, yashchenko\_anatoliy@mail.ru

**Для цитирования:** Курчидис В.А., Анисимов О.В., Ященко А.В. Формирование концептуальной модели радиоэлектронной аппаратуры на основе семантических шаблонов, интегрированных со средой разработки электрических схем // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2018. Т. 10. № 3. С. 30-39. doi 10.24411/2409-5419-2018-10073.

## Введение

Технической основой современных сложных технических комплексов является радиоэлектронная аппаратура (РЭА), время восстановления которой после отказа оказывает существенное влияние на значение коэффициента готовности таких комплексов. Одной из основных операций при восстановлении радиоэлектронной аппаратуры выступает техническое диагностирование, которое связано с поиском мест и причин отказа с точностью до типового элемента замены.

Существенный вклад в значение времени восстановления РЭА вносит время выполнения операций технического диагностирования, которые связаны с формированием диагностической информации, необходимой для поиска мест и причин отказа. При этом формирование такой информации осуществляется с применением соответствующих средств систем информационной поддержки (СИП).

Исследованию вопросов поиска, предоставления и формирования диагностической информации при восстановлении РЭА посвящены многочисленные работы отечественных и зарубежных ученых [1–2; 4; 8; 11–12]. В этих работах рассматриваются модели для представления РЭА, а также методы и подходы на их основе, направленные на сокращение времени формирования диагностической информации. С точки зрения повышения уровня автоматизации средств информационной поддержки в техническом диагностировании следует отметить работы [4; 11], в которых рассматривается подход к формированию ДИ в виде фрагментов электрических схем, основанный на использовании концептуального модельного представления РЭА.

Основой подхода, предложенного в [4; 11], выступает дескриптивная модель РЭА на основе фреймов (ДФМ), с помощью которой обеспечивается согласование концептуального и схемно-графического представления аппаратуры на основе электрических схем. При этом используется специальное графическое представление электрических схем с помощью паттернов, которое отображается в предметно-графической объектной модели радиоэлектронной аппаратуры. Достоинство описанного подхода состоит в том, что его использование позволяет оперировать с диагностической информацией в рамках конструкций естественно-подобного языка и предоставляет обслуживающему персоналу возможность формировать диагностическую информацию путем задания условий, выражаемых в предметных терминах и понятиях естественного языка.

Однако использование такого подхода в практике связано с необходимостью ручной обработки большого объема данных, содержащихся в эксплуатационных документах, для создания соответствующего формализованного концептуального представления компонентов РЭА в виде модели ДМФ, а также для перехода к предметно-графи-

ческому представлению аппаратуры и естественно-подобному языку запросов [4]. При этом следует отметить, что создание модели ДМФ выполняется «вручную» по имеющемуся комплексу электрических схем на РЭА, что равносильно выполнению отдельного трудоемкого, дорогостоящего проекта и требует создания соответствующих средств автоматизации для его реализации. Вследствие этого для сложных технических комплексов подготовка, верификация и актуализация модели ДМФ с практической точки зрения труднореализуема, так что положительный эффект от использования обсуждаемого подхода носит скорее методологический, нежели прикладной характер. Поэтому подход, представленный в [4; 11], целесообразно рассматривать, как перспективное направление совершенствования систем информационной поддержки технического диагностирования, который требует своего дальнейшего развития.

С этой точки зрения представляет интерес предлагаемый в работе подход к построению концептуальной модели РЭА, особенность которого состоит в том, что осуществляется многоаспектное (структурное, функциональное, параметрическое и т.п.) описание радиоэлектронной аппаратуры в пространстве свойств, которое представляется на основе совокупности семантических шаблонов, определяющих описание аппаратуры в предметных терминах и понятиях естественного языка. Такое представление аппаратуры с точки зрения диагностирования позволяет рассматривать всякий отказ, как нарушение совокупности номинальных свойств аппаратуры. При этом свойства, характеризующие функциональность, параметры, структуру и конструктивные особенности аппаратуры, определяются в терминах и понятиях предметной области.

Особенность предлагаемого подхода состоит в том, что концептуальная модель создается на основе предметных понятий и терминов, которые используются для представления аппаратуры в виде электрических схем. Следует отметить, что электрические схемы в существующих системах информационной поддержки технического диагностирования РЭА выступают в качестве одного из важных источников диагностической информации для определения вероятного места и причины отказа [12–13]. Электрическая схема (как документ) создается на этапе разработки и проектирования РЭА с помощью средств систем автоматизированного проектирования (САПР) и поставляется эксплуатанту в составе комплекта эксплуатационных документов совместно с аппаратурой. Особенностью электрических схем является то, что они представляют компоненты аппаратуры в виде соответствующих схемных элементов. При этом представление компонентов РЭА на схеме определяется типом электрической схемы и используемыми условными графическими обозначениями в соответствии с ГОСТ 2.610–2006, ГОСТ 2.701–2008 и ГОСТ Р 54088–2010.

**Формализованное представление радиозлектронной аппаратуры в пространстве свойств**

**на основе семантических шаблонов**

Формализованное представление РЭА в пространстве свойств  $\hat{P}$  описано в [5] и имеет следующий вид:  $\hat{P} = \langle \hat{E}, \hat{R}(\hat{E}) \rangle$ . В этом выражении отражен взгляд на представление РЭА, как на конечную совокупность элементов  $\hat{E} = \{E_1, E_2, \dots, E_Q\}$  и отношений  $\hat{R}(E_1, E_2, \dots, E_Q)$  между ними. Здесь множество всех элементов представления РЭА определяется экземплярами  $E_i \in \hat{E}$  сущностей  $\psi_i \in \Psi$  типа  $i$  ( $i = \overline{1, Q}$ ), где  $\Psi$  — множество всех сущностей, используемых в предметном представлении РЭА, а  $Q$  — общее количество сущностей. Примерами таких сущностей могут выступать понятия предметной области, используемые для названий типов структурных и функциональных элементов аппаратуры, функций, наименований и маркировок, параметров, значений параметров и т.д. При этом всякое свойство РЭА  $p \in \hat{P}$  формально определяется, как отношение  $p = r(e^{(1)}, e^{(2)}, \dots, e^{\zeta(p)})$ , связывающие некоторое число экземпляров сущностей  $e^{(i)} \in \hat{E}$ ,  $i = \overline{1, \zeta(p)}$ , где  $\zeta(p)$  — число экземпляров сущностей, участвующих в формировании свойства  $p$ . Число  $\zeta(p)$  определяет порядок отношения, так, что при  $\zeta(p)=1$  отношение является унарным, при  $\zeta(p) = 2$  — бинарным и т.д. Совокупность всех рассматриваемых отношений на множестве  $\hat{E}$  для конкретного РЭА обозначается, как  $\hat{R} = \hat{R}(\hat{E})$ . При этом необходимо отметить, что, в отличие от сущностей  $\Psi$ , отношения в множестве  $\hat{R}$  представляются уникальными понятиями, т.е. используются в представлении  $\hat{P}$  в одном экземпляре.

Предложенное в [5] пространство свойств  $\hat{P}$  определяет концептуальное представление РЭА в предметных понятиях и терминах естественного языка. С точки зрения представления РЭА в виде множества  $\hat{P}$  следует отметить, что оно отражает сведения об аппаратуре, необходимые для выполнения операций технического диагностирования. Источником таких сведений могут выступать, в частности, данные из комплекта эксплуатационных документов на РЭА, а также представления обслуживающего персонала о необходимой диагностической информации.

В отличие от [5], в данной работе для формализации концептуального представления РЭА предлагается использовать триплетную форму определения отношений [3; 7], которая используется в семантических сетях [6]. При этом свойства аппаратуры представляются в виде совокупности триплетов. Примером триплета, выражающего некоторое свойство аппаратуры, является высказывание «блок А выполняет функцию Б», в котором отношение «выполняет» связывает две сущности «блок» и «функция». Эти две сущности характеризуют аппаратуру на основе соответствующих экземпляров — «блок А» и «функция Б».

Всякий триплет  $\tau$  имеет структуру вида «субъект-отношение-объект» и формально может быть записан в виде выражения  $\tau = \langle \alpha R \beta \rangle$ , где  $\alpha$ ,  $R$  и  $\beta$  определяются понятиями предметной области, отражающими различные аспекты представления РЭА (структурный, функциональный, параметрический и т.п.) на электрических схемах в терминах естественного языка. В триплетах в качестве субъектов и объектов могут использоваться как сущности (сущности-субъекты и сущности-объекты), так и экземпляры сущностей, что определяет два соответствующих вида триплетов: триплеты первого и второго вида, для различения которых предлагается использовать соответствующие обозначения  $\tau'$  и  $\tau''$ .

В триплетах  $\tau'$  первого вида используются понятия, связанные с типами структурных компонентов аппаратуры (блок, ячейка, разъем и т.д.) и их атрибутами (маркировка, название, позиционное обозначение и т.д.), выполняемыми функциями (функция, функциональная задача и т.д.) и их атрибутами (имя функциональной задачи, имя выполняемой функции и т.д.), параметрами РЭА и их атрибутами, представлением электрических цепей (цепь, цепь прохождения сигнала и т.д.) и их атрибутами, а также с графическими элементами (графическими примитивами, условными графическими обозначениями и т.д.), используемыми для представления компонентов аппаратуры на электрических схемах.

Триплеты первого вида целесообразно использовать для представления семантических шаблонов. При этом всякий семантический шаблон  $F(\alpha)$  для любой сущности  $\alpha \in \Psi$  определяется, как некоторая совокупность триплетов первого вида  $\tau' = \langle \alpha R \beta \rangle$ , так, что:

$$F(\alpha) \subset \bigcup_{\beta \in \Psi} \{ \tau' \mid \tau' = \langle \alpha R \beta \rangle \}$$

Триплеты первого вида позволяют отражать различные аспекты представления РЭА, поэтому множество таких триплетов целесообразно определенным образом структурировать. Так, для описания структурного аспекта РЭА в качестве элементов представления на основе триплетов могут выступать понятия предметной области, описывающие элементы структурной иерархии изделия: блок, ячейка, плата, разъем, контакт и т.п. Для описания функционального аспекта РЭА на основе триплетов в качестве элементов представления могут использоваться понятия предметной области, описывающие обозначения, аббревиатуры либо названия выполняемых функций. Для описания параметрического аспекта РЭА на основе триплетов  $\tau'$  в качестве элементов представления могут выступать понятия предметной области, описывающие параметры с их значениями. Все вышеперечисленные триплеты относятся к классу внутриаспектных триплетов. Например, триплет «ячейка входит в блок» является внутриаспектным и определяет представление конкретного структурного свойства аппара-



ты. Триплет «функция зависит от функции» также является внутриаспектным и определяет представление конкретного функционального свойства аппараты.

В то же время при представлении РЭА в виде триплетов  $\tau'$  необходимо учитывать наличие межаспектных свойств аппаратуры, которые отражают отношения между понятиями, описывающими разные аспекты аппаратуры. Так, триплеты «ячейка выполняет функцию» и «функция зависит от параметра» являются примерами межаспектных триплетов.

В этом смысле семантические шаблоны выступают в качестве универсальных концептуальных моделей, поскольку в них учитываются как внутриаспектные, так и межаспектные свойства сущностей. Так как число сущностей РЭА, отражающих представление РЭА на основе электрических схем ограничено и относительно невелико, целесообразно для каждой сущности создать свой семантический шаблон, который позволяет определять раздельное описание сущности. Таким образом, с концептуальным представлением РЭА может быть связана полная совокупность семантических шаблонов  $\hat{F} = \{F(\alpha) / \alpha \in \Psi\}$ , с помощью которой выполняется описание всех сущностей  $\alpha$  из множества  $\Psi$ .

Семантические шаблоны формируются для каждой сущности, используемой при описании РЭА, с учетом представления аппаратуры в понятиях и терминах предметной области. При этом всякая сущность представляется понятием предметной области, которое характеризует некоторый элемент описания радиоэлектронной аппаратуры.

Разнообразие семантических шаблонов определяется видом и сложностью рассматриваемой радиоэлектронной аппаратуры, а одни и те же сущности могут использоваться при построении различных семантических

шаблонов. При этом следует отметить, что в структуре семантических шаблонов учитываются правила описания аппаратуры, которые регламентируются нормативной и эксплуатационной документацией. Графически пример семантического шаблона  $F(\text{ячейка})$  для сущности *ячейка* может быть представлен в виде, показанном на рис. 1.

Основу этого шаблона составляет сущность *ячейка*, которая связана множеством отношений с другими сущностями (*название, конструктивное обозначение, функциональная группа* и др.), каждая из которых имеет свой семантический шаблон.

### Формирование представления экземпляра сущности по семантическим шаблонам

С точки зрения выполнения операций технического диагностирования нужны не столько семантические шаблоны, сколько описание конкретных свойств аппаратуры. В триплетной форме такое описание осуществляется в виде триплетов  $\tau''$  второго вида, которые создаются на основе экземпляров  $e \in E_i$  сущностей  $\psi_i \in \Psi$ ,  $i = \overline{1, Q}$ . В таких триплетах в качестве субъектов и объектов выступают экземпляры сущностей, например, блок с конкретным названием (Блок А), функция с конкретным названием (функция синхронизации), параметр с конкретным значением (напряжение +5В) и т.д.

С точки зрения описания конкретных свойств аппаратуры следует рассмотреть формирование множества  $\Theta_{e(\alpha)}$  всех триплетов  $\tau''$  второго вида, сопряженных с одним экземпляром  $e_\alpha = e(\alpha) \in \hat{E}$  некоторой сущности  $\alpha = \psi_{e(\alpha)} \in \Psi$ . Для этого целесообразно ввести следующие обозначения:

$E(\alpha)$ ,  $E(\beta)$  — множество всех экземпляров сущностей  $\alpha$ ,  $\beta$  соответственно,

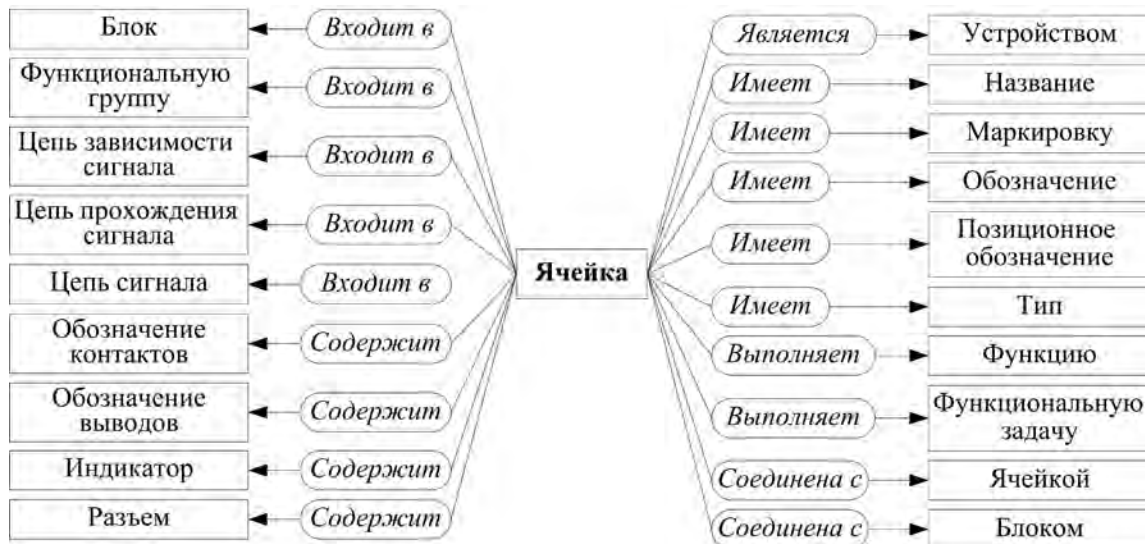


Рис. 1. Графическое представление семантического шаблона сущности ячейка



$E(\alpha)$  — семантический шаблон для сущности, определяемой экземпляром  $e(\alpha) \in \hat{E}$ ,

$R(\alpha) = R(e_\alpha)$  — множество отношений, участвующих в представлении семантического шаблона  $E(\alpha)$ ,

$B(e_\alpha, R)$  — множество сущностей-объектов в триплетях, определяемых отношением  $R \in R(\alpha)$  шаблона  $E(\alpha)$ .

С учетом этих обозначений множество  $\Theta_{e(\alpha)}$  можно определить следующим образом:

$$\Theta_{e(\alpha)} = \bigcup_{R \in R(\alpha)} \bigcup_{\beta \in B(e(\alpha), R)} \bigcup_{e(\beta) \in \hat{E}(\beta)} \langle e(\alpha) R e(\beta) \rangle \quad (1)$$

Формула (1) фактически определяет правила формирования концептуального представления экземпляра любой сущности по ее семантическому шаблону. При этом все триплеты множества  $\Theta_{e(\alpha)}$  характеризуются тем, что в качестве первого элемента (субъекта) этих триплетов выступает один и тот же экземпляр  $e(\alpha) \in \hat{E}$  сущности  $\alpha \in \Psi$ .

Учитывая, что предлагаемый подход к формированию концептуального представления аппаратуры ориентирован на использование технологий автоматизированного проектирования при разработке электрических схем, целесообразно рассмотреть правила выполнения электрических схем разных типов, в особенности правила выполнения таких элементов представления и описания, как условные графические обозначения (УГО) и условные буквенно-цифровые обозначения (УБЦО), и которые представляются в САПР на основе библиотечных элементов [9; 14; 10; 15]. Общая совокупность библиотечных элементов, используемых в при разработке электрических схем, ниже обозначается, как  $\hat{\Omega} = \{\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_n\}$ . При этом всякий  $i$ -й библиотечный элемент целесообразно представить в виде упорядоченной пары

$$\Omega_i = \langle \Gamma_i, H_i \rangle.$$

В этом выражении  $\Gamma_i$  определяет вид условного графического обозначения соответствующего схемного элемента, а  $H_i$  совокупность полей для определения условных буквенно-цифровых обозначений, имеющих соответствующие атрибуты  $\hat{O}_i = \langle O_{1i}, O_{2i}, \dots, O_{\mu_i} \rangle$ . При этом следует отметить, что элементы  $O_{ji} \in \hat{O}_i$  с точки зрения понятийного анализа схем представляют названия атрибутов соответствующих полей  $H_i$ , которые определяют сущности, участвующие в описании схемы. Эти сущности задействованы при формировании семантических шаблонов  $\hat{F}$ , так, что они отражены в структуре хотя бы одного шаблона из множества  $\hat{F}$ .

Условное буквенно-цифровое обозначение, представляя некоторую сущность, характеризуется тем, что в структуре своих полей оно может содержать либо не содержать представление других сущностей. В связи с этим целесообразно различать сущности двух видов:

сущности первого вида  $\Psi^{(1)} \subset \Psi$ , структура представления которых на схеме в виде УБЦО не содержит представления других сущностей,

сущности второго вида  $\Psi^{(2)} \subset \Psi$ , структура представления которых на схеме в виде УБЦО содержит представления других сущностей.

Такое разделение сущностей на два вида  $\Psi^{(1)}$  и  $\Psi^{(2)}$  необходимо учитывать при рассмотрении атрибутов библиотечных элементов так, что во всяком библиотечном элементе  $\Omega_i \in \hat{\Omega}$  выделяются две соответствующие группы атрибутов  $O_i^{(1)} \subset \hat{O}_i$  и  $O_i^{(2)} \subset \hat{O}_i$ .

При таком представлении библиотечных элементов находит отражение то обстоятельство, что с точки зрения формирования экземпляров сущностей интерес представляет не анализ графического представления схемных компонентов, определяемых библиотечными элементами, а их логико-предметный анализ, что определяется особенностями концептуального представления аппаратуры.

Предложенное представление библиотечных элементов  $\hat{\Omega}$  целесообразно рассматривать в связи с использованием сущностей в семантических шаблонах  $\hat{F}$ . С этой точки зрения необходимо ввести соответствие  $\mathfrak{R}: \hat{F} \rightarrow \hat{\Omega}$  между шаблонами множества  $\hat{F}$  и библиотечными элементами множества  $\hat{\Omega}$ . При этом  $\mathfrak{R}(\alpha)$  обозначает соответствие между одним семантическим шаблоном  $F(\alpha)$  и множеством  $\hat{\Omega}$ , которое осуществляется на основании анализа нотаций, определяющих структуру УБЦО при выполнении электрических схем [10].

Для формального определения  $\mathfrak{R}(\alpha)$  необходимо ввести следующие множества:

$\hat{O} = \bigcup_{i \in \Psi} \bigcup_{j \in \mu_i} O_{ji}$  — множество атрибутов, которые соответствуют условным буквенно-цифровым обозначениям, используемым во всех библиотечных элементах  $\hat{\Omega}$ ,

$B(\alpha) = \bigcup_{i=1}^{i=K_\alpha} \beta_i(\alpha)$  — множество элементов-объектов триплетов  $\tau \in F(\alpha)$ .

Формально  $\mathfrak{R}(\alpha)$  устанавливает соответствие между множествами  $B(\alpha)$  и  $\hat{O}$ , так, что  $\mathfrak{R}(\alpha): B(\alpha) \rightarrow \hat{O}$ . Элементами этого соответствия (рис. 2) выступают пары вида  $\langle \beta(\alpha), O \rangle$ , причем эти пары устанавливаются путем предметного сопоставления атрибутов полей УБЦО  $H_i$  с сущностями семантического шаблона  $F(\alpha)$ . Соответствие  $\mathfrak{R}(\alpha)$  может быть представлено в виде таблицы, которая составляется на основе правил создания и использования УБЦО на электрических схемах [9–10].

Тогда для решения задачи формирования представления экземпляров сущностей необходимо для всякого конкретного экземпляра  $e_\alpha$  сущности  $\alpha$  определить все экземпляры сущностей  $\beta \in B(\alpha)$ , которые удовлетворяют логике соответствия  $\mathfrak{R}(\alpha)$  и логике семантического шаблона  $F(\alpha)$ . При этом необходимо принять во внимание, что при разработке электрической схемы библиотечные элементы используются для создания различных схем-

ных элементов. Для описания этого целесообразно ввести обозначение  $\Lambda_r$ , которое определяет некоторый схемный элемент, создаваемый на основе библиотечного элемента  $\Omega_r$ . Для всякого схемного элемента  $\Lambda_i$  характерно следующее: графически он представляется в форме УГО, определяемого его видом  $\Gamma_i(\Omega_i)$ , а предметно содержит набор значений  $Z_i = \langle z_{1i}, z_{2i}, \dots, z_{\mu_i} \rangle$ , элементы  $z_{ji}$  которого являются значениями атрибутов  $O_{ji} \in \hat{\Omega}_i$ . Собственно значения атрибутов представляются на электрической схеме в соответствии с правилами заполнения УБЦО, и эти значения являются основой для формирования экземпляров сущностей.

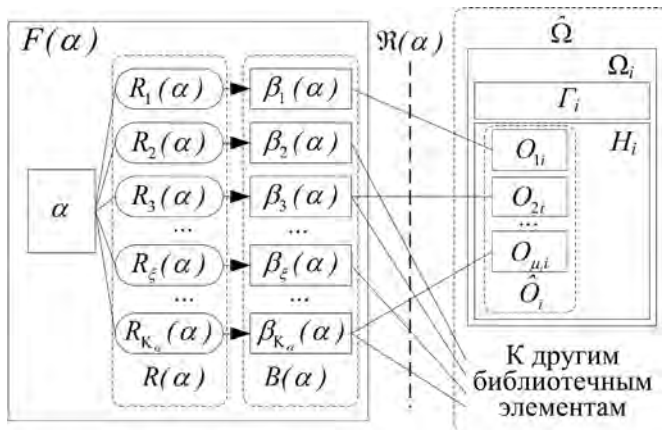


Рис. 2. Графическое представление соответствия между семантическим шаблоном сущности и библиотечными элементами

При этом основная трудность состоит в том, что использование одного библиотечного элемента может быть недостаточно для формирования экземпляра  $e_\alpha \in E(\alpha)$  сущности  $\alpha$ . Это связано с тем, что всякий библиотечный элемент создается под определенный тип  $t$  электрической схемы и позволяет отражать только те элементы представления, которые определяются этим типом схемы. Поэтому целесообразно определить множество всех схемных элементов  $\hat{\Lambda}^{\epsilon_\alpha} = \langle \Lambda_1^{\epsilon_\alpha}, \Lambda_2^{\epsilon_\alpha}, \dots, \Lambda_\gamma^{\epsilon_\alpha} \rangle$ , которые формируются на основе соответствующих библиотечных элементов  $\hat{\Omega}(\alpha)$  для конкретного экземпляра  $e_\alpha$  сущности  $\alpha$  на всех типах электрических схем. В связи с этим следует ввести соответствие  $\mathfrak{Z}: \Psi \rightarrow \hat{\Omega}$ , в котором всякой сущности  $\alpha \in \Psi$  сопоставляется множество  $\hat{\Omega}(\alpha) = \mathfrak{Z}(\alpha)$  библиотечных элементов, которые могут использоваться для формирования экземпляра  $e_\alpha$  на электрических схемах разных типов. При этом следует заметить, что максимальное число  $\gamma$  библиотечных элементов множества  $\hat{\Omega}(\alpha) = \langle \Omega_1(\alpha), \Omega_2(\alpha), \dots, \Omega_\gamma(\alpha) \rangle$  не может превышать семи ( $\gamma \leq 7$ ), поскольку общее число типов  $t$  электрических схем в соответствии с ГОСТ 2.701–2008 равно семи ( $t = 1, 2, \dots, 7$ ).

В множестве  $\hat{\Lambda}^{\epsilon_\alpha}$  каждый элемент  $\hat{\Lambda}_i^{\epsilon_\alpha}$  в соответствии с его схемным представлением характеризуется совокупностью значений атрибутов  $Z(\Lambda_i^{\epsilon_\alpha}) = \langle z_{1i}^{\epsilon_\alpha}, z_{2i}^{\epsilon_\alpha}, \dots, z_{\mu_i}^{\epsilon_\alpha} \rangle$ , причем структура кортежа  $Z(\Lambda_i^{\epsilon_\alpha})$  определяется структурой множества атрибутов  $\hat{O}_i(\alpha)$  библиотечного элемента  $B_i(\alpha)$ . В этом кортеже величина  $\mu = \mu(e_\alpha)$  определяет количество атрибутов  $\Lambda_i^{\epsilon_\alpha}$  в зависимости от  $e$  и  $\alpha$ .

Сформированное множество  $Z(\Lambda_i^{\epsilon_\alpha})$  является основой для формирования триплетов множества  $\Theta_{e(\alpha)}$ , определяющего концептуальное представление экземпляра сущности  $\alpha$  в соответствии с ее шаблоном  $F(\alpha)$ . При этом для использования шаблона  $F(\alpha)$  необходимо для каждого элемента  $z_{ji}^{\epsilon_\alpha} \in Z(\Lambda_i^{\epsilon_\alpha})$  установить соответствующую сущность  $\beta_{N^{\epsilon_\alpha(j,i)}}(\alpha) \in B(\alpha)$ , чтобы разрешить значение соответствующего атрибута  $z_{ji}^{\epsilon_\alpha}$  в понятиях предметной области не естественном языке. Это обеспечивается с помощью соответствия  $\mathfrak{R}^{-1}(\alpha)$ , обратного определенному выше соответствию  $\mathfrak{R}(\alpha)$ . Такое разрешение является однозначным ввиду однозначности отображения  $\mathfrak{R}^{-1}(\alpha)$ . Определенный таким образом элемент  $\beta_{N^{\epsilon_\alpha(j,i)}}(\alpha)$  в соответствии с шаблоном  $F(\alpha)$  однозначно задает отношение  $R_{N^{\epsilon_\alpha(j,i)}}(\alpha)$  между сущностью  $\alpha$  и сущностью  $\beta_{N^{\epsilon_\alpha(j,i)}}(\alpha)$ , что фактически обеспечивает формирование триплета  $\tau' = \langle e(\alpha) R_{N^{\epsilon_\alpha(j,i)}}(\alpha) \beta_{N^{\epsilon_\alpha(j,i)}}(\alpha) \rangle$  второго вида, который связывает два экземпляра сущностей  $e(\alpha)$  и  $\beta_{N^{\epsilon_\alpha(j,i)}}(\alpha)$ . Таким образом могут быть сформированы все триплеты  $\tau'' \in \Theta_{e(\alpha)}$ , определяющие представление экземпляры  $e_\alpha$  сущности  $\alpha$ .

Объединение триплетов  $\tau''$ , получаемых для всех элементов множества  $Z(\Lambda_i^{\epsilon_\alpha})$ , позволяет определить множество  $\Theta_{e(\alpha)}$  в следующем виде:

$$\Theta_{e(\alpha)} = \bigcup_{j=1}^{\mu} \bigcup_{i=1}^{i=1/\mu_j} \langle e(\pm) R_{N^{\epsilon_\alpha(j,i)}}(\pm) \beta_{N^{\epsilon_\alpha(j,i)}}(\pm) \rangle \quad (2)$$

Выполненная формализация определяет общую логику формирования экземпляра  $\Theta_{e(\alpha)}$  сущности  $\alpha$ . С учетом всех принятых обозначений графически эта логика представлена на рис. 3. Фактически на этом рисунке показано, что определяющим элементом при формировании экземпляра всякой сущности  $\alpha$  выступает ее шаблон  $F(\alpha)$ . При этом выполненная формализация направлена на то, чтобы в соответствии с выбранной сущностью  $\alpha$  по ее семантическому шаблону  $F(\alpha)$  определить множество  $\Theta_{e(\alpha)}$ .

Рассмотренные выше действия, связывая структуры семантических шаблонов и библиотечных элементов, обеспечивают формирование подмножества концептуальной модели РЭА в виде совокупности триплетов  $\Theta_{e(\alpha)}$ , определяемых одним экземпляром  $e_\alpha$  некоторой сущности  $\alpha$ .

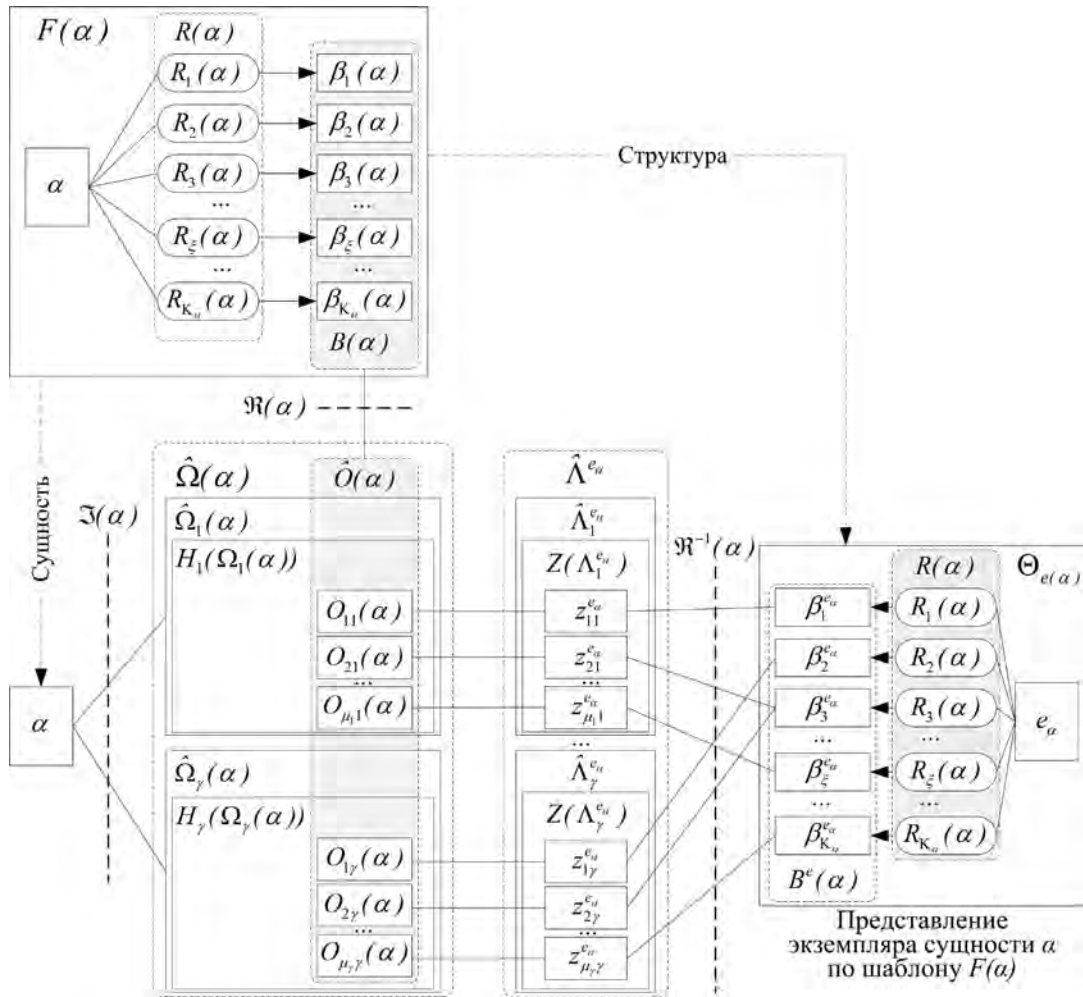


Рис. 3. Общая логика формирования множества триплетов  $\Theta_{e(\alpha)}$

### Формирование концептуальной модели радиоэлектронной аппаратуры

Множества  $\Theta_{e(\alpha)}$  можно определить для всех экземпляров  $e_\alpha$  одной сущности  $\alpha$ , что позволяет на их основе сформировать полное множество  $\hat{\Theta}$  всех триплетов второго вида в следующем виде:

$$\hat{\Theta} = \bigcup_{\alpha \in \Psi} \bigcup_{e(\alpha) \in \hat{E}} \Theta_{e(\alpha)} \quad (3)$$

У всех триплетов множества  $\hat{\Theta}$  объектами и субъектами выступают конкретные экземпляры сущностей, так, что всякий триплет  $\tau^n \in \hat{\Theta}$  определяет конкретное бинарное свойство  $p \in \hat{P}$  радиоэлектронной аппаратуры. Очевидно, что совокупность  $\hat{\Theta}$  сформированных триплетов определяет пространство свойств, совпадающее с пространством  $\hat{P}$ , которое выступает в качестве концептуального представления аппаратуры. Это означает, что множество  $\hat{\Theta}$  можно рассматривать, как семантическую сеть,

определяющую концептуальное модельное представление радиоэлектронной аппаратуры. Совокупность  $\hat{\Theta}$  триплетов, формируемых на основе семантических шаблонов  $\hat{F}$ , можно рассматривать как основу для формирования пространства свойств  $\hat{P}$  средствами семантических сетей.

Таким образом, для формирования концептуальной модели РЭА необходимо по аналогии с описанными выше действиями создать множества  $\hat{\Theta}_{e(\alpha)}$  для всех экземпляров  $e_\alpha$  всех сущностей  $\alpha \in \Psi$ . Объединение создаваемых таким образом множеств в соответствии с формулой (3) определяет представление РЭА в виде совокупности триплетов  $\hat{\Theta}$  выступающей в качестве формализованной концептуальной модели аппаратуры. Такой подход к формированию модели РЭА  $\hat{\Theta}$  основывается на формулах (1), (2) и (3), совместное использование которых фактически определяет структуру предлагаемого способа формирования концептуальной модели РЭА на основе семантических шаблонов, интегрированных со средой раз-

работки электрических схем, а также последовательность выполняемых при этом действий.

Выполненная формализация показывает, что для создания концептуальной модели РЭА в виде множества  $\hat{\Theta}$  необходимо, во-первых, сформировать множество семантических шаблонов  $\hat{F}$ , а во-вторых, сформировать множество триплетов, определяющих по электрическим схемам представление экземпляра всякой сущности на основе ее семантического шаблона. В предлагаемом подходе к созданию концептуального модельного представления РЭА формирование множества семантических шаблонов выполняется посредством понятийного анализа предметной области, а экземпляры сущностей создаются на основе интеграции сформированных семантических шаблонов с библиотечными средствами САПР электрических схем РЭА.

### Заключение

Предлагаемый подход к созданию концептуальной формализованной модели радиоэлектронной аппаратуры может быть использован в процессе совершенствования существующих или при разработке новых систем информационной поддержки технического диагностирования (СИП ТД), которые ориентированы на использование электронного дела изделия, как основного элемента разрабатываемой системы интегрированной логистической поддержки жизненного цикла изделий. При этом учитывается тот факт, что электронное дело изделия создается разработчиками сложных технических комплексов и содержит актуальную информацию об изделии, в том числе о техническом диагностировании изделия в целом и радиоэлектронной аппаратуры в его составе.

Предлагаемый подход уже на этапе разработки изделия средствами САПР позволяет автоматизировать формирование концептуальной модели РЭА, что принципиально отличает его от существующих подходов к формированию моделей. В настоящее время данный подход реализован в виде программного модуля, интегрированного со средой разработки Altium Designer. Целесообразность использования предлагаемого подхода подтверждена для компонентов аппаратуры конструктивного уровня ячейка и блок.

Характеризуя предлагаемый подход с точки зрения практики технического диагностирования, следует отметить высокий положительный эффект от совмещения концептуального и схемно-технического представления аппаратуры изделий, который состоит в уменьшении времени, затрачиваемого на поиск, извлечение и формирование необходимой диагностической информации, предоставляемой в форме фрагментов электрических схем. За счет этого обеспечивается повышение эффективности выполнения операций технического диагностирования

обслуживающим персоналом и процесса восстановления аппаратуры в целом.

### Литература

1. Heider R. Improving the quality of technical data for developing case based reasoning diagnostic software for aircraft maintenance // 13th International Conference on Data Engineering and Proceedings. 1997. Pp. 584–589.
2. Czichos H. Handbook of Technical Diagnostics/ Fundamentals and Application to Structures and Systems. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013. 566 p.
3. Horridge M., Knublauch H, Rector A, Stevens R, Wroe Ch. A Practical Guide To Building OWL Ontologies Using The Protege-OWL Plugin and CO-ODE Tools Edition 1.0 / The University Of Manchester, Stanford University, 2004. 118 p.
4. Анисимов О. В. Модели радиоэлектронной аппаратуры как основа организации информационных интерфейсов в системах автоматизации технической эксплуатации: Монография. М.: Нобель Пресс, 2013. 88 с.
5. Игнатьев С. В., Тихонов В. Б., Анисимов О. В. Основные направления совершенствования системы технической эксплуатации радиоэлектронной аппаратуры зенитного ракетного вооружения // Военная мысль. 2011. Т. 8. № 3. С. 72–77.
6. Гаврилова Т. А., Хорошевский В. Ф. Базы знаний интеллектуальных систем. СПб.: Питер, 2000. 384 с.
7. Муромцев Д. И. Онтологический инжиниринг знаний в системе Protégé. СПб: Изд-во НИУ ИТМО, 2007. 62 с.
8. Барзилевич Е. Ю. Модели технического обслуживания сложных систем. М.: Транспорт, 1981. 195 с.
9. Лаврищев И. Б., Кириков А. Ю., Добряков В. А. Разработка принципиальных электрических схем систем управления процессами пищевых производств. СПб.: Изд-во НИУ ИТМО, 2004. 38 с.
10. Мактас М. Я. Проектирование печатных плат в САПР Altium Desiner. В 2 ч. Ч. 2. Ульяновск: УлГТУ, 2015. 94 с.
11. Анисимов О. В., Курчидис В. А. Формирование диагностической информации в виде фрагментов электрических схем радиоэлектронной аппаратуры // Труды МАИ. 2017. № 94. URL: [http://mai.ru/upload/iblock/b17/anisimov-kurchidis\\_rus.pdf](http://mai.ru/upload/iblock/b17/anisimov-kurchidis_rus.pdf).
12. Милерян Е. А. Психология формирования общетрудовых политехнических умений. М.: Педагогика, 1973. 300 с.
13. Ксенз С. П. Диагностика и ремонтпригодность радиоэлектронных средств. М: Радио и связь, 1989. 248 с.
14. Веккер Л. М. Психика и реальность. Единая теория психических процессов. М.: Смысл, 1998. 343 с.
15. Якубовская Е. С. Проектирование и САПР систем автоматизации. В 2 ч. Ч. 2. Минск: Изд-во БГАТУ, 2012. 280 с. ISBN978–985–519–450–8.



## RADIOELECTRONIC EQUIPMENT CONCEPTUAL MODEL FORMATION BASED ON SEMANTIC TEMPLATES INTEGRATED WITH THE ELECTRICAL CIRCUITS DESIGN ENVIRONMENT

**VIKTOR A. KURCHIDIS,**

Yaroslavl, Russia, idahmer2@yandex.ru

**OLEG V. ANISIMOV,**

Yaroslavl, Russia, qwaker@inbox.ru

**ANATOLIY V. IASHCHENKO,**

Yaroslavl, Russia, yashchenko\_anatoliy@mail.ru

**KEYWORDS:** conceptual model; semantic template; technical diagnostic; radio electronic equipment; semantic network.

### ABSTRACT

Radioelectronic equipment conceptual model formation is proposed. The feature of such formation is that a multidimensional description of radioelectronic equipment in the space of properties that determine the equipment description in subject terms and concepts of natural language is realized. Such a representation of the equipment from the diagnosis point of view gives us the opportunity to consider any failure as an equipment nominal properties set violation. In such a case, the properties that characterize the equipment functionality, parameters, structure and design features are defined in terms and concepts of the subject area.

It is proposed to use the triplet form to represent the equipment properties, which is used in semantic networks, during the radioelectronic equipment conceptual representation formalizing. Such a representation of properties is the basis for the equipment semantic templates representation form. The formalization which provides the use of semantic templates for radioelectronic equipment representation in terms and concepts of the subject area and the equipment representation at electrical circuits based on library elements of computer-aided design systems agreement is done.

Radioelectronic equipment conceptual model creation method can be used in the process of improving existing or developing new technical diagnostics information support systems that are oriented to the use of the product electronic dossier as a part of product life-cycle integrated logistic support system.

The proposed method provides the radioelectronic equipment conceptual model formation at the stage of product development using computer-aided design tools that fundamentally distinguishes it from existing hardware models formation methods. This method is implemented as a software module integrated with the Altium Designer environment. The proposed method practicability is confirmed for the cell and the unit structural level of the equipment components.

### REFERENCES

1. Heider R. Improving the quality of technical data for developing case based reasoning diagnostic software for aircraft maintenance. 13th International Conference on Data Engineering and Proceedings, 1997. Pp. 584-589.
2. Czichos H. *Handbook of Technical Diagnostics/ Fundamentals and Application to Structures and Systems*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013. 566 p.
3. Horridge M., Knublauch H, Rector A, Stevens R, Wroe Ch. *A Practical Guide To Building OWL Ontologies Using The Protege-OWL Plugin and CO-ODE Tools Edition 1.0*. The University Of Manchester, Stanford University, 2004. 118 p.
4. Anisimov O.V. Modeli radioelektronnoj apparatury kak osnova organizacii informacionnyh interfejsov v sistemah avtomatizacii tekhnicheskoy ehkspluatcii: Monografiya [Models of radio electronic equipment as a basis for organization of information interfaces in systems of automation of technical operation: Monograph]. Moscow: Nobel' Press, 2013. 88 p. (In Russian)
5. Ignat'ev S.V., Tihonov V.B, Anisimov O.V. Osnovnye napravleniya sovershenstvovaniya sistemy tekhnicheskoy ehkspluatcii radioelektronnoj apparatury zenitnogo raketnogo vooruzheniya [The main directions of improvement of the system of technical operation of radio-electronic equipment of anti-aircraft missile weapons]. *Voennaya mysl'*. 2011. Vol. 8. No. 3. Pp. 72-77. (In Russian)
6. Gavrilova T.A., Horoshevskij V.F. *Bazy znaniy intellektual'nyh sistem* [Knowledge bases of intellectual systems]. St. Petersburg: Piter, 2000. 384 p. (In Russian)
7. Muromcev D.I. *Ontologicheskij inzhiniring znaniy v sisteme Protégé* [Ontologic engineering of knowledge in Protégé system]. St. Petersburg: ITMO University Publ., 2007. 62 p. (In Russian)
8. Barzilevich E. Ju. Modeli tehniceskogo obsluzhivaniya slozhnyh system [Models of maintenance of difficult systems]. Moscow: Transport, 1981. 195 p. (In Russian)

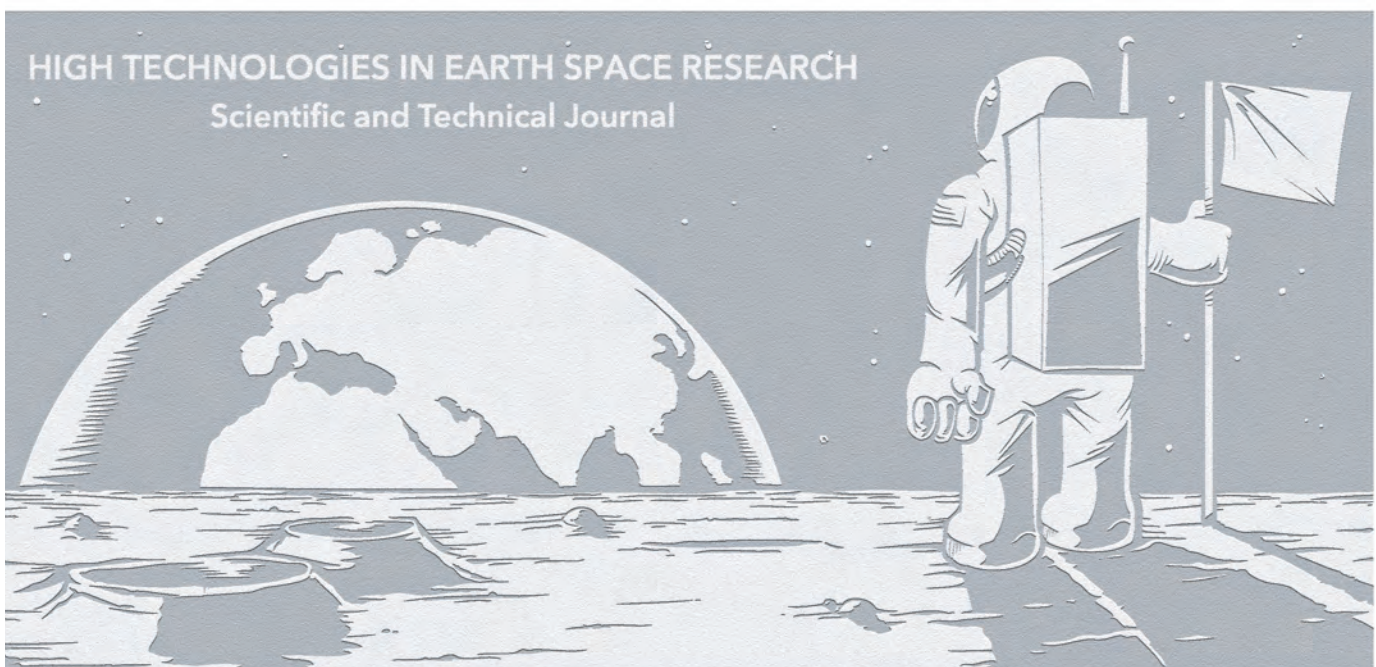


9. Lavrishhev I.B., Kirikov A. Ju., Dobrjakov V.A. *Razrabotka principial'nyh jelektricheskikh shem sistem upravleniya processami pishhevyykh proizvodstv* [Development of schematic electric circuits of control systems by processes of food productions]. St. Petersburg: ITMO University Publ., 2004. 38 p. (In Russian)
10. Maktas M. Ja. *Proektirovanie pechatnykh plat v SAPR Altium Designer*. [Designing printed circuit boards in Altium designer CAD]. In 2 pt. Pt. 2. Ul'janovsk: Ulyanovsk State Technical University Publ., 2015. 94 p. (In Russian)
11. Anisimov O.V., Kurchidis V.A. *Formirovanie diagnosticheskoy informatsii v vide fragmentov ehlektricheskikh skhem radioehlektronnoy apparatury* [Formation of diagnostic information in the form of fragments of electrical circuits of electronic equipment]. *Trudy MAI*. 2017. No. 94. URL: [http://mai.ru/upload/iblock/b17/anisimov-kurchidis\\_rus.pdf](http://mai.ru/upload/iblock/b17/anisimov-kurchidis_rus.pdf). (In Russian)
12. Mileryan E.A. *Psikhologiya formirovaniya obshchetrudovyykh politekhnicheskikh umeniy* [Psychology of formation of General equipment Polytechnic skills]. Moscow: Pedagogika, 1973. 300 p. (In Russian)
13. Ksenz S.P. *Diagnostika i remontoprigradnost' radioehlektronnykh sredstv* [Diagnostics and maintainability of radio electronic equipment]. Moscow: Radio i svyaz', 1989. 248 p. (In Russian)
14. Vekker L.M. *Psihika i real'nost'. Edinaya teoriya psihicheskikh processov* [Psyche and reality. Unified theory of mental processes]. Moscow: Smysl, 1998. 343 p. (In Russian)
15. Jakubovskaja E.S. *Proektirovanie i SAPR sistem avtomatizatsii* [Design and CAD of automation systems]. In 2 pt. Pt. 2. Minsk: Belarusian State Agrarian Technical University Publ., 2012. 280 p. (In Russian)

#### INFORMATION ABOUT AUTHORS:

Kurchidis V.A., PhD, Professor, Professor of the Yaroslavl Higher Military College Of Anti-Air Defense;  
Anisimov O.V., PhD, Docent, Professor of the Yaroslavl Higher Military College Of Anti-Air Defense;  
Iashchenko A.V., Postgraduate of the Yaroslavl Higher Military College Of Anti-Air Defense.

**For citation:** Kurchidis V.A., Anisimov O.V., Iashchenko A.V. Radioelectronic equipment conceptual model formation based on semantic templates integrated with the electrical circuits design environment. *H&ES Research*. 2018. Vol. 10. No. 3. Pp. 30-39. doi: 10.24411/2409-5419-2018-10073 (In Russian)



doi: 10.24411/2409-5419-2018-10074

# ЭФФЕКТИВНОСТЬ DPI-СИСТЕМЫ ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ТРАФИКА И ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ОБСЛУЖИВАНИЯ ОТТ-СЕРВИСОВ

**ЕЛАГИН**

**Василий Сергеевич<sup>1</sup>**

**ЗАРУБИН**

**Антон Александрович<sup>2</sup>**

**ОНУФРИЕНКО**

**Анастасия Валентиновна<sup>3</sup>**

**Сведения об авторах:**

<sup>1</sup>к.т.н., доцент кафедры инфокоммуникационных систем Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А.Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, Россия, elagin.vas@gmail.com

<sup>2</sup>к.т.н., доцент кафедры инфокоммуникационных систем Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А.Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, Россия, azarubin@sut.ru

<sup>3</sup>магистрант Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, Россия, anastasia.4991@mail.ru

**АННОТАЦИЯ**

В работе вводится определение термина ОТТ-сервиса, приводятся описание услуг данных сервисов и сравнение с традиционными услугами. Показана классификация услуг, предоставляемых ОТТ-сервисами.

Определены ключевые показатели сетевых характеристик, необходимые для обеспечения заданного качества обслуживания при предоставлении и передаче трафика разного вида.

Обозначены проблемы, связанные с передачей данных по сетям оператора связи, при появлении ОТТ-сервисов на российском рынке. Определены различные классы приоритезации трафика, основанные на требованиях и поведении определенных видов приложений, позволяющие обеспечить максимальную гибкость передачи пользовательской информации, в связи с чем, для необходимой корректировки работы сети приводятся перспективные подходы и процедуры DPI-технологии, обеспечивающие необходимые требования для Quality of Service при предоставлении ресурсов своей сети для ОТТ-сервисов.

Рассматривается возможность применения DPI-системы на сети и ее взаимодействия с ОТТ-сервисами на базе открытых решений. Исследуются блок-схемы, составленные на основе сигнатур распознавания ОТТ-трафика. Получены графики результатов проведенного эксперимента и проведен обзор работоспособности сигнатур, выведены формулы для оценки вероятности событий и применены для соответствующего статистического анализа.

Подведены итоги исследования влияния сигнатур для ОТТ-сервисов разных видов трафика на дальнейшие исследования и перспективы внедрения технологии. Обозначены проблемы, связанные с применением DPI, приведены варианты их решения.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** ОТТ; ОТТ-сервис; Deep Packet Inspection; Software Defined Network; программно-конфигурируемая сеть; QoS; качество обслуживания.

**Для цитирования:** Елагин В. С., Зарубин А. А., Онуфриенко А. В. Эффективность DPI-системы для идентификации трафика и обеспечения качества обслуживания ОТТ-сервисов // Научно-технические исследования в космических исследованиях Земли. 2018. Т. 10. № 3. С. 40-53. doi: 10.24411/2409-5419-2018-10074

В настоящее время, телекоммуникационные услуги можно разделить на два типа: управляемые услуги и услуги, предоставляемые OTT-сервисами.

Предполагается, что у провайдера имеется частичный контроль над управляемыми услугами. Поставщик обладает возможностью использовать элементы управления для выбора параметров передачи, а во многих случаях для резервирования пропускной способности сети для гарантии необходимого качества обслуживания. Таким образом, управляемые услуги тесно связаны с базовой сетью[1].

OTT-сервисы и связанные с ними приложения полагаются на Интернет общего пользования. В данном случае Интернет-провайдер не несет ответственности за содержимое пакетов, а так же не обязан гарантировать качественную доставку.

OTT (англ. OVERTHETOP) — метод предоставления контента через Интернет на широкий спектр пользовательских устройств по сетям передачи данных без участия оператора в управлении и распределении контента.

OTT-сервисы предоставляют зрителю существенную свободу выбора, персональный подбор услуг не зависимо от провайдера, что позволяет получить доступ к ней в любой точке мира и в любое время при наличии подключения к Интернету. Коммуникационные приложения, такие как VoIP или Интернет-сообщения постепенно могут заменить услуги телефонной связи и sms, предлагаемые операторами связи.

В отличие от операторов связи OTT-игроки не озабочены вопросами технического обслуживания сетей, увеличения их пропускной способности, поскольку используют чужие сети.

Сегодня услуги, предоставляемые OTT-сервисами, можно разделить на [2]:

1. Потокное вещание — непрерывная трансляция аудиовизуальных материалов в потоковом режиме. Не подразумевает произвольной остановки пользователем с последующим воспроизведением с той же точки.
2. Видео по запросу — система индивидуальной доставки контента по запросу пользователя. Как правило, предполагает индивидуальный доступ к просмотру.
3. Текстовые мессенджеры — программа, мобильное приложение или веб-сервис для мгновенного обмена текстовыми сообщениями.
4. Голосовые мессенджеры — программа, мобильное приложение или веб-сервис для мгновенного обмена голосовыми сообщениями.
5. Социальные сети.
6. Облачные сервисы.
7. Другие.

Сегодня пользователи все больше обращаются к услугам OTT-сервисов и все меньше прибегают к традиционным услугам операторов связи. Однако данные сервисы

опираются на сетевую инфраструктуру, построенную традиционными операторами, в связи с чем оператор лишь предоставляет свою сеть.

Хотя использование OTT-сервисов растет, благодаря их доступности и широкому распространению, часть пользователей готова заплатить за гарантированное качество при использовании любимых приложений, чем использовать бесплатные сервисы с негарантированным качеством (рис. 1).



Рис. 1. Данные опроса пользователей по оплате контента (Источник: Ericsson ConsumerLab)

Так как Интернет является «неуправляемой» сетью, где ширина полосы не может контролироваться на всем маршруте передачи информации от серверов до конечного пользователя, то предполагается, что пользователи справедливо разделяют доступные сетевые ресурсы [3]. Трафик передается со скоростью максимально возможной при имеющейся нагрузке ресурсов сети, но при этом не гарантируется обеспечение предварительно заданного качества обслуживания, что означает, что нет гарантии в том, что пакет будет доставлен в заданное время или, что он будет доставлен вообще, причем вне зависимости от типа трафика [4].

Как только появляется недостаток ресурсов, ведущих к увеличению вероятности потерь пакетов и росту их задержек, необходимые показатели качества для приложений реального времени не могут быть обеспечены.

В результате ухудшения скорости потока, приложение начинает предоставлять низкое качество и периодически останавливать воспроизведение, либо происходит отказ в выполнении той или иной операции, что отрицательно сказывается на впечатлении пользователей о качестве услуг.

Итак, для того чтобы сервисы начали полноценно работать, нужно гарантировать высокое качество доставки контента [5].

Поэтому традиционным операторам необходимо сделать фундаментальный выбор: либо усовершенствовать свою сеть набор своих услуг изадействовать новые технологии, либо согласиться с ролью обычного поставщика инфраструктуры для других игроков, приняв как данность, что те лучше работают по части услуг [6,7].

Широкое распространение ОТТ-сервисов в настоящее время существенно меняет параметры сети и задает новые требования для работы сети оператора связи.

Важно определить ключевые понятия, необходимые для рассмотрения показателей качества обслуживания.

Качество обслуживания (quality of service) — совокупность характеристик услуг электросвязи, которые имеют отношение к возможности удовлетворять установленные и предполагаемые потребности пользователя услуги [8].

Эти параметры используются для оценки качества конкретных аспектов услуги. В зависимости от задачи оценки качества используются соответствующие параметры с требуемой глубиной детализации.

Для установления требований к QoS, предъявляемых пользователями, наряду с определением критериев качества необходимо составить перечень параметров с указанием их приоритетов и предпочтительных значений характеристик работы.

Ключевые параметры, влияющие на восприятие контента пользователем [8]:

1. Задержка — проявляется в ряде направлений, в том числе во времени, необходимом, чтобы предоставить конкретную услугу от первоначального запроса пользователя до момента получения конкретной информации, как только будет создана служба.

Причины появления задержек: Очереди в узлах, оконечные устройства (джиттер-буфер); оконечные устройства (кодирование, декодирование, шифрование); задержка распространения; механизмы обслуживания очередей.

2. Изменения задержки (Джиттер) — вариация задержки, как правило, включается в качестве параметра производительности, важна на транспортном уровне из-за естественного изменения во времени прихода отдельных пакетов.

Причины появления джиттера: Асинхронность IP-сети, динамическая маршрутизация, пачечный характер трафика.

3. Потери информации — имеет самое непосредственное влияние на качество информации для пользователя, будь то голос, изображение, видео или данные.

Причины появления потерь: Перегрузки узлов, ошибки в канале, механизмы профилирования трафика, оконечные устройства (из-за превышения максимально допустимой задержки).

В данной ситуации оператор может предложить установление приоритетов трафика, что в свою очередь должно позволить обеспечить максимальную гибкость для реализации услуг. Соответственно, могут разрабатываться соглашения по различным услугам для своих клиентов.

Для диапазона мультимедийных приложений, определяются несколько отдельных категорий по признаку толерантности к потере информации и задержкам. Указанные категории образуют основу для определения реалистичных классов QoS для основных транспортных сетей, а также соответствующие механизмы контроля QoS[6, 9].

Количество классов сознательно ограничивается, чтобы упростить проектирование сетей операторов, поэтому цели в каждом классе должны удовлетворять потребности нескольких приложений.

В сети связи, при участии ОТТ-сервисов, процессы обмена и распределения информации основаны на принципах, свойственных системам передачи данных.

Нормы на параметры доставки пакетов IP с разделением по классам обслуживания указаны в табл. 1 (модель МСЭ-Т Y.1541).

Таблица 1

Нормы на параметры доставки пакетов IP с разделением по классам обслуживания

Сетевые характеристики	Классы QoS					
	0	1	2	3	4	5
Задержка доставки пакета	100 мс	400 мс	100 мс	400 мс	1 с	Н
Вариация задержки пакета	50 мс	50 мс	Н	Н	Н	Н
Коэффициент потери пакетов	$1 \times 10^{-3}$	$1 \times 10^{-3}$	$1 \times 10^{-3}$	$1 \times 10^{-3}$	$1 \times 10^{-3}$	Н
Коэффициент ошибок пакетов	$1 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-4}$	Н

**Примечание:** Н — не нормировано.

Класс 0: Приложения реального времени, чувствительные к джиттеру, характеризуемые высоким уровнем интерактивности

Класс 1: Приложения реального времени, чувствительные к джиттеру, интерактивные

Класс 2: Транзакции данных, характеризуемые высоким уровнем интерактивности

Класс 3: Транзакции данных, интерактивные приложения

Класс 4: Приложения, допускающие низкий уровень потерь

Класс 5: Традиционные применения IP-сетей.



Табл. 1 отражает один из принципов QoS для развития классов, требования нескольких приложений рассматривают единые требования к рабочим характеристикам сети.

Чтобы у оператора была возможность идентифицировать OTT-сервисы, применять к сервисам, ориентированным на обмен разного вида трафика, уникальные надстройки (в виде классификации, приоритезации) и дальнейшей корректировки полосы пропускания и других сетевых характеристик предлагаем рассмотреть использование DPI-системы в сети.

Перспективно рассмотреть технологические особенности DPI-систем, по обеспечению QoS на сети провайдера для выделенных OTT-сервисов.

DeepPacketInspection (DPI) — совокупное название технологий, позволяющей проводить накопление, анализ, классификацию, контроль и модификацию сетевых пакетов в зависимости от их содержимого в реальном времени при которых оборудование реагирует не только на заголовки пакетов разного уровня, но и на содержимое (рис. 2). Из-за обширности применения DPI, эта технология получает свое широкое распространение у операторов, предоставляющих услуги [10].

Технология DPI выполняет глубокий анализ проходящих через нее пакетов. Глубокий анализ подразумевает

под собой не только анализ по стандартным номерам портов, но и анализ пакетов на верхних уровнях модели OSI (Open System interconnection) (рис. 3). Не считая того, что изучение пакетов по неким стандартным параметрам, по которым можно однозначно распознать принадлежность пакета к определённому приложению.

Таким образом, политики для каждого приложения будут установлены в момент разработки приложения или перенесены на платформу, как услуга, и будут охватывать, например, производительность, требования соответствия уровня надежности, и другие характеристики. В данном вопросе DPI является технологией, которая как раз справится с этими вопросами: она определяет конкретные приложения в режиме реального времени при определенных ключевых узловых точках, применяет политику (при необходимости). Политики могут включать в себя блокирование, оптимизации, определения приоритетов, и так далее.

DPI анализ основывается на следующих механизмах:

1. Явно заданные правила.

Правила и политики задаются администратором системы, полностью или частично из предоставленных наборов разработчика системы, путём активирования нужных правил и политик.

2. Сигнатурный анализ.

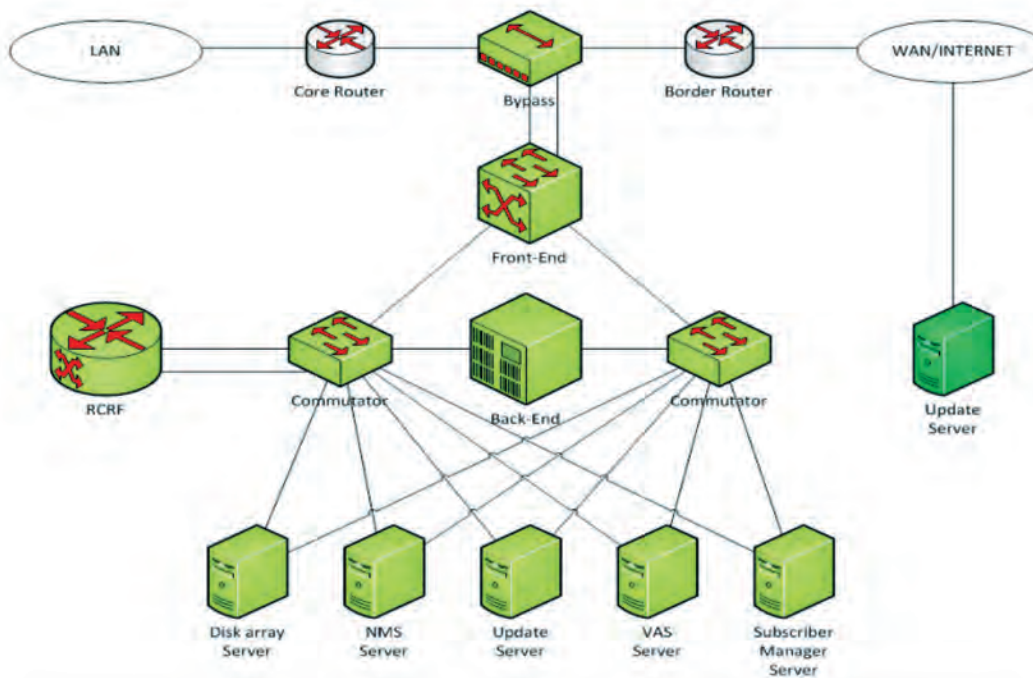


Рис. 2. Архитектура DPI-системы



Рис. 3. Работа DPI на разных уровнях

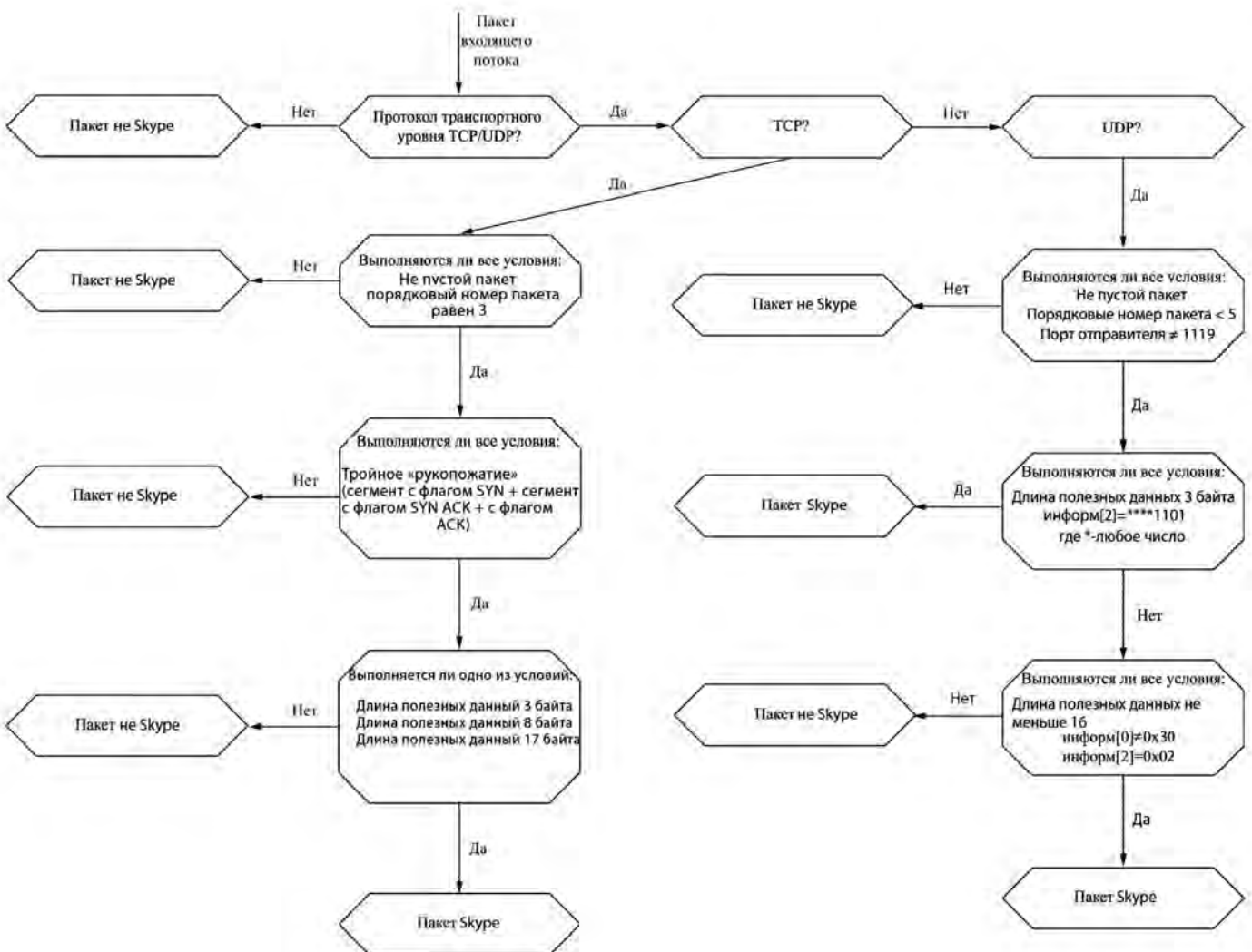


Рис. 4. Блок-схема сигнатуры распознавания трафика Skype

Сигнатурный анализ — это анализ при котором система обнаружения производит поиск в анализируемой структуре и сравнивает его с известными ей случаями.

### 3. Эвристический анализ.

Эвристический анализ — это технология обнаружения трафика по признакам (без гарантированной точности). Используется, когда невозможно определить трафик с помощью сигнатурного анализа, то есть с помощью поиска и сравнения по базе сигнатур.

### 4. Анализ поведения трафика

Поведенческий алгоритм анализа похож на сигнатурный, но вместо базы сигнатур используется база с моделями поведения трафика. Для идентификации трафика посредством поведенческого анализа отслеживается какой-то отрезок времени, в течение которого идёт передача, и на основании анализа поведения трафика на этом отрезке путем сравнения с базой принимается решение.

При рассмотрении вопросов о качестве обслуживания трафика OTT-сервисов, необходимо чётко и однозначно дифференцировать различные типы OTT-сервисов. А так же дать единое определение для разных типов OTT-сервисов и установить единообразное регулирование в указанной области с технической точки зрения [11–12].

Необходимо проверить достоверность идентификации OTT-сервисов существующими DPI-системами. Т.е. насколько точно мы можем распознавать разные приложения, используя эту систему.

Рассмотрим реакцию системы на три разных вида трафика трех различных OTT-сервиса (Skype, KakaoTalk, Hangout).

DPI в большинстве случаев использует для идентификации трафика сигнатурный анализ.

Пример сигнатур взятых для распознавания трафика преобразованы в блок-схемы (рис. 4–6).

На данных схемах видно, что присутствует значительное различие в методах проверки трафика. Проверим достоверность данных сигнатур в ходе эксперимента.

Для проведения эксперимента была использована распространенная система DPI с открытым исходным кодом для анализа трафика и для проверки правильности и целостности, написанной сигнатуры, а также корректности работы DPI-системы был использован сниффер «Wireshark».

Данная DPI-система выводит информацию о сети с возможностью ее сортировки по задействованным приложениям, протоколам, хостам или портам, также она может записывать трафик и собирать статистику.

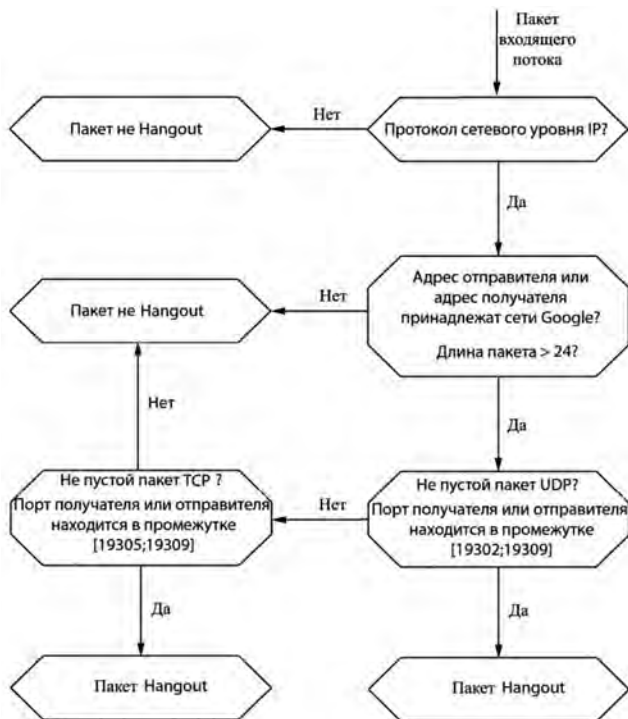


Рис. 5. Блок-схема сигнатуры распознавания трафика Hangout

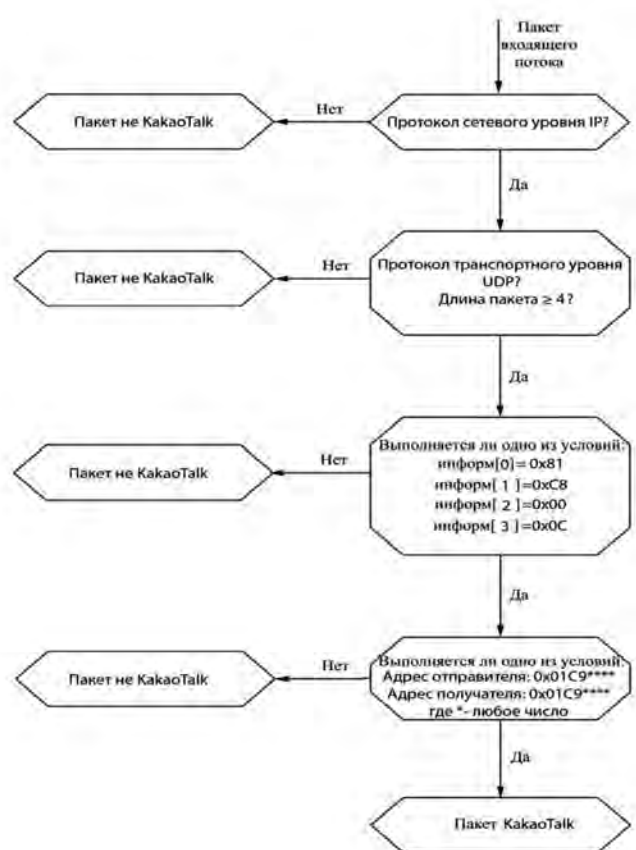


Рис. 6. Блок-схема сигнатуры распознавания трафика KakaoTalk

Схематическая модель проведения эксперимента (рис. 7):

При проверке распознаваемости приложений DPI-системой мы получили более 100 экспериментов. Для идентификации данных передавали один и тот же файл размером 1.7 Мб, для речи было воспроизведено одинаковое 20 секундое аудио, для видео — 20 секундная трансляция.

Полученные в ходе эксперимента результаты сведем в графики и проведем анализ работоспособности сигнатур (рис. 8–9).

Так как эксперимент неоднородный дальнейшие расчеты производились на основании основных понятий

и определений теории вероятности с помощью следующих формул:

$$P_i = \begin{cases} \frac{DPI}{S}, & 5A \cdot 8 \cdot DPI \leq S \\ \frac{S - |S - DPI|}{S}, & 5A \cdot 8 \cdot DPI \geq S \end{cases}, \quad (1.1)$$

$$P_i = \begin{cases} \frac{DPI}{S}, & 5A \cdot 8 \cdot DPI \leq S \\ \frac{S - |S - DPI|}{S}, & 5A \cdot 8 \cdot DPI \geq S \end{cases}, \quad (1.2)$$

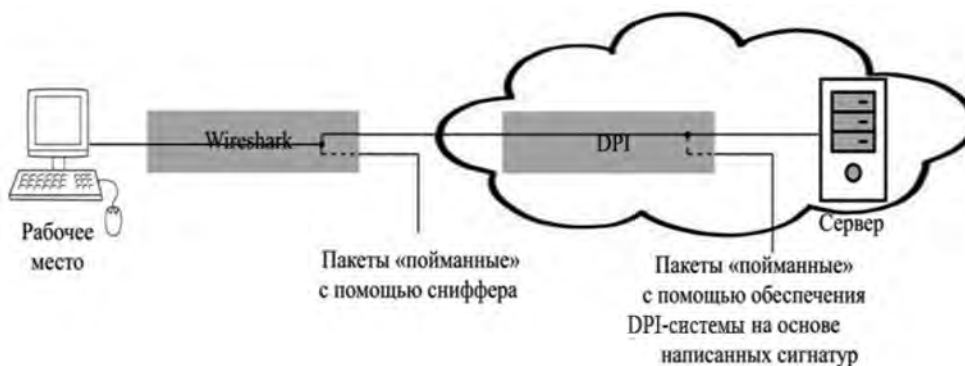


Рис. 7. Модель эксперимента

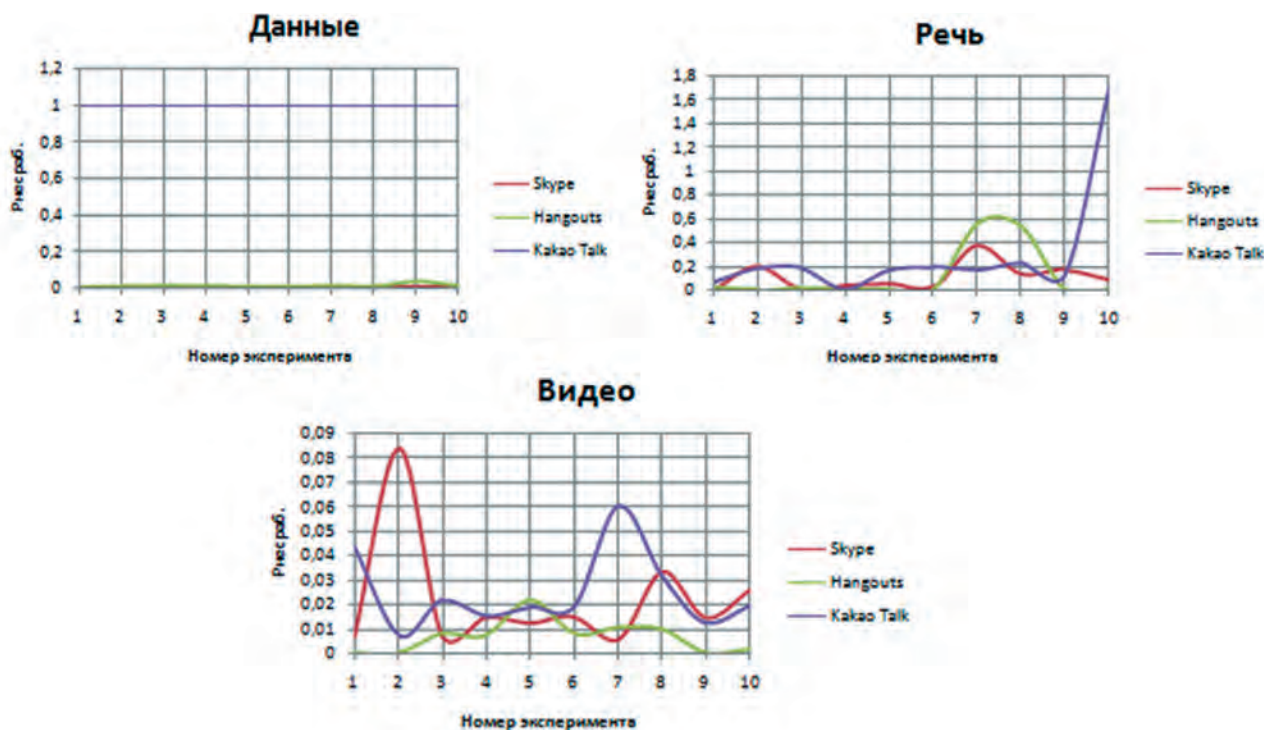


Рис. 8. Графики, отражающие вероятность срабатывания системы в результате эксперимента



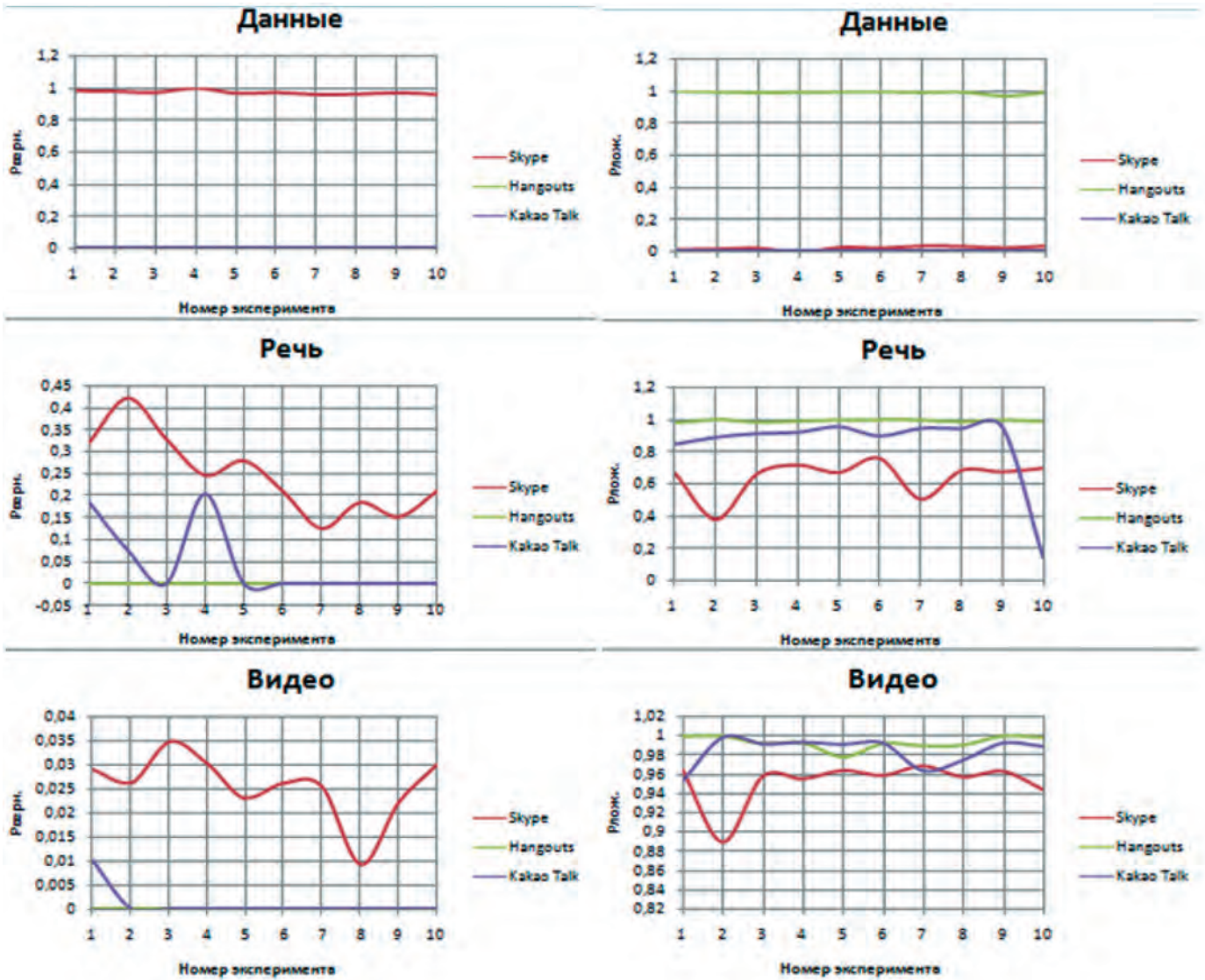


Рис. 9. Графики, отражающие вероятность несрабатывания и вероятность ложного срабатывания системы в результате эксперимента

$$P_n = \frac{S - \sum_{i=0}^k \overline{DPI}_i - \sum_{i=0}^k DPI_i + \sum_{i=0}^k \widetilde{DPI}_i}{Wireshark}, \quad (1.3)$$

$$P = P_i + P_f + P_n, \quad (1.4)$$

где  $P_i$  (Вероятность верного срабатывания системы) — Вероятность того, что трафик точно определен статистическим критерием (формула 1.1);

$P_f$  (Вероятность ложного срабатывания) — Вероятность того, что трафик неверно отвергнут статистическим критерием или что за исходный трафик принят ложный трафик (формула 1.2);

$P_n$  (Вероятность несрабатывания) — Вероятность того, что система не распознает, что в данном сеансе связи было использовано интересное нас приложение (формула 1.3);

$\overline{DPI}_i$  — объем трафика неверно распознанного DPI-системой;

$DPI_i$  — объем трафика верно распознанного DPI-системой;

$\widetilde{DPI}_i$  — объем трафика нераспознанного DPI-системой;

$S$  — эталонный, переданный приложением трафик.  
Полученные в ходе обработки данные были подвержены статистическому анализу при помощи характеристик, выраженных формулами [13]:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}, \quad (1.5)$$

где  $\bar{X}$  (Среднее значение) — числовая характеристика, заключённая между наименьшим и наибольшим из их значений (формула 1.5);

$$D[X] = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n}, \quad (1.6)$$

где  $D[X]$  (Дисперсия случайной величины) — мера разброса значений случайной величины относительно её математического ожидания (формула 1.6);

$$R = X_{\max} - X_{\min}, \quad (1.7)$$

где  $R$  (Размах вариации) — числовая характеристика, равная разнице между наименьшим и наибольшим из их значений, показывает пределы, в которых изменяется величина признака в изучаемой совокупности (формула 1.7);

$$q = \frac{R}{\bar{X}}, \quad (1.8)$$

где  $q$  (Относительный размах вариации (коэффициент осцилляции)) — это отношение размаха вариации к средней.

Отражает относительную колеблемость крайних значений признака вокруг средней (формула 1.8);

$$p = \frac{\sqrt{D[X]}}{\bar{X}}, \quad (1.9)$$

где  $p$  (Коэффициент вариации) — характеристика, позволяющая судить об однородности совокупности (формула 1.9):

- $< 0,17$  — абсолютно однородная;
- $0,17-0,33$  — достаточно однородная;
- $0,35-0,40$  — недостаточно однородная;
- $0,40-0,60$  — говорит о большой колеблемости совокупности.

Рассмотрим анализ для ОТГ- сервиса Skype, статистические характеристики для других сервисов рассчитываются по аналогичным формулам.

Приведенные расчеты отражают, что для вероятности верного срабатывания разброс средних значений для разных видов трафика крайне велик, что может говорить об отсутствии положительной системности в работе DPI-системы при распознавании различных видов трафика и приложений.

Дисперсия показывает, что для одинаково вида трафика в пределах одного приложения приблизительно одинаковый результат обнаружения.

Таблица 2

Рассчитанные значения для вероятности верного срабатывания

Приложение	Вид трафика	Средние значения	Дисперсия	Размах вариации	Относительное отклонение по модулю (линейный коэффициент вариации)	Коэффициент вариации
Skype	Данные	0,9731	0,0002	0,0402	0,0092	0,0126
	Речь	0,2564	0,0096	0,3230	0,2769	0,3826
	Видео	0,0282	0,0000	0,0128	0,1776	0,1351

Таблица 3

Рассчитанные значения для вероятности ложного срабатывания

Приложение	Вид трафика	Средние значения	Дисперсия	Размах вариации	Относительное отклонение по модулю (линейный коэффициент вариации)	Коэффициент вариации
Skype	Данные	0,0269	0,0002	0,0402	0,3345	0,4564
	Речь	0,6475	0,0070	0,2932	0,1251	0,1288
	Видео	0,9565	0,0000	0,0205	0,0146	0,0073

Таблица 4

Рассчитанные значения для вероятности несрабатывания

Приложение	Вид трафика	Средние значения	Дисперсия	Размах вариации	Относительное отклонение по модулю (линейный коэффициент вариации)	Коэффициент вариации
Skype	Данные	0,0961	0,0030	0,1751	-	-
	Речь	0,0153	0,000046	0,0204	0,9049	0,5679
	Видео	0,0961	0,0030	0,1751	0,9779	0,4438

Размах вариации, среднее линейного отклонение для разных видов трафика одного приложения различается из-за колебания значений в разных экспериментах.

Коэффициент вариации позволяет судить об однородности совокупности для данных и видео, а для речи — недостаточной однородности.

Стоит отметить, что при одной и той же сигнатуре разные виды трафика имеют разную степень детектирования, что указывает на непроработанность сигнатур и невозможность использования одной сигнатуры для разных типов трафика в рамках одного приложения.

### Предварительные итоги:

1. При анализе сигнатур разных OTT-сервисов можно заметить, что у Skype, как уже давно распространяемого, устоявшегося приложения сигнатура разработана гораздо лучше, чем у новых приложений (из исследуемых) у которых на данный момент сигнатуры менее разработаны, что негативно сказывается на применении DPI-системы для введения определенных политик для конкретного вида трафика (трафика конкретного приложения).

2. Исследования показали, что для приложений со слабо разработанными сигнатурами использовать DPI для идентификации трафика OTT-сервисов нельзя, так как происходят несрабатывания и ложные срабатывания из-за близости или некорректности сигнатур, в связи, с чем мы можем пропускать необходимый нам трафик, либо применять к нему неверные политики, что исказит результаты применения системы.

Вариантами решения этих проблем могут стать следующие подходы:

1. Использование комбинированных методов для повышения распознаваемости трафика, включая поведенческий и эвристический анализ;

2. Дополнительная проработка сигнатур;

3. Четкая маркировка сервисов (со стороны производителя OTT-сервиса). Необходимо сотрудничество OTT-сервисов с операторами связи, что бы предоставлялись актуальные сигнатуры и идентификаторы. Обеспече-

ние взаимодействия не на уровне неизвестного трафика, а на уровне соглашения оператора связи и OTT-сервисов на идентификацию трафика в общем потоке с помощью маркировки трафика потребует от оператора связи большой объем надстроек на каждом пограничном узле, что легко решается в SDN, т.к. на контроллер можно указать правила.

Проблема OTT-сервисов плохо решается в текущих сетях, но с внедрением SDN сильно упроститься процесс управления трафиком.

Программно-конфигурируемая сеть (англ. SDN — Software Defined Network) — концепция, предполагающая разделение уровня управления и передачи трафика, позволяющая изменять методы построения сетей и их эксплуатации [14–15].

Основная суть SDN состоит в физическом отделении уровня управления сетью от уровня передачи данных за счет переноса функций управления на контроллер, упрощение элементов уровня передачи данных, логически централизованное управление сетью, осуществляемое с помощью контроллера и реализованными поверх сетевыми приложениями [16].

SDN является одним из актуальнейших вариантов решения, позволяющих упростить и ускорить процессы внедрения, развертывания новых и изменения уже существующих услуг без необходимости установки новых сетевых устройств, а так же увеличить конкурентоспособность отдельного продукта.

DPI может предоставить подробные данные, для информирования контроллера SDN о состоянии сети и потоках ее трафика. Это позволяет SDN рассматривать сеть как целостный ресурс, а не как различные группы устройств. В конечном счете, объединение SDN и DPI позволит применять политики контроля и автоматизации для всей сети в целом.

Рассмотрим особенности размещения DPI систем на разных уровнях [10]:

С относительной легкостью, программное обеспечение DPI может быть встроено на уровне бизнес-при-

ложений. Тем не менее, некоторым приложениям может потребоваться минимизирование влияния узких мест, созданных длительным путем передачи данных.

Учитывая возможность задержек, такое развертывание DPI-системы (рис. 10) лучше всего работает для не критичных ко времени использования сетевых приложений.

Программное обеспечение DPI может быть развернуто на контроллере SDN (рис. 11). Тем не менее, часть неопознанного трафика должна быть отправлена на DPI-систему для опознания, что повлечет проблемы масштабируемости и производительности. После этого все последующие потоки одного и того же типа не требуют анализа DPI, что может привести к тому, что будут пропущены «опасные» пакеты.

Сетевые устройства тоже могут запустить программное обеспечение DPI, и после идентификации приложений и метаданных, они могут либо применять предварительно определенную политику, либо отправить эту информацию в контроллер SDN или сетевым приложением, а затем получить обратно политику или правило. Реализация системы DPI на коммутаторе очень выгодна в том случае, если

у нас есть жесткое требование к ограничению какого-либо трафика, т.к. абсолютно все пакеты пройдут через систему и будут подвергнуты тщательной проверке. К сожалению, такое воздействие повлияет на производительность сети и может привести к задержкам.

По сравнению с другими вариантами, реализации DPI в слое узла минимизирует задержку (рис. 12). Однако этот подход является дорогостоящим, поскольку он требует наибольшее количество экземпляров в сети.

Таким образом, для наших целей логично расположить DPI-систему на промежутке между контроллером и коммутаторами.

Принимая во внимание выше изложенное, применение технологий SDN является одним из актуальнейших вариантов решения, проблем для оператора связи, появившихся в результате неконтролируемого роста трафика OTT-сервисов.

Уникальное преимущество SDN заключается в том, что виртуальные сетевые функции гораздо более динамичны, чем их традиционные программно-аппаратные аналоги, так как они могут быть развернуты и удалены по

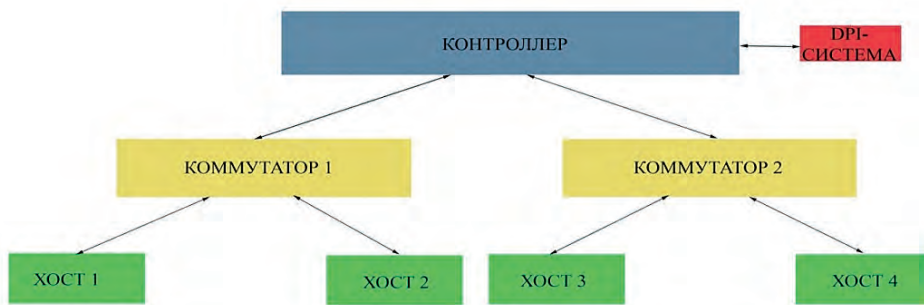


Рис. 8. Графики, отражающие вероятность срабатывания системы в результате эксперимента

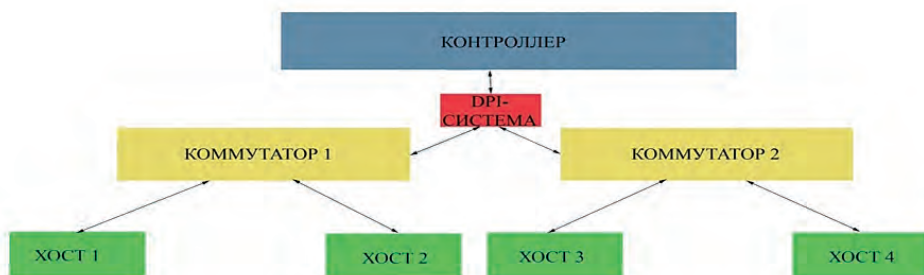


Рис. 8. Графики, отражающие вероятность срабатывания системы в результате эксперимента



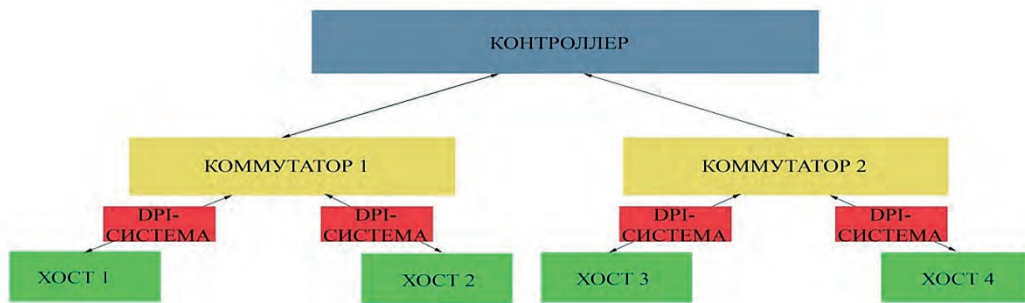


Рис. 8. Графики, отражающие вероятность срабатывания системы в результате эксперимента

требованию и масштабироваться в соответствии с изменением объема трафика. Новые надстройки станут возможно добавлять и запускать, просто установив программное обеспечение, не подключая отдельных сетевых устройств.

Целесообразность внедрения оператором технологии SDN определяется достижением наилучшего качества для передачи определенного контента, путем присвоения трафику различных уровней приоритетов, однако не стоит забывать про принцип сетевой нейтральности, который основывается на следующих принципах: отсутствие со стороны участников рынка дискриминации по отношению к данным, информации или приложениям; взаимодействие между участниками рынка в интересах максимального удовлетворения потребностей потребителей, повышения качества предоставляемых услуг; управление трафиком в той мере, в которой это необходимо для обеспечения целостности сети и безопасности потребителей и государства; разумное управление трафиком в той мере, в какой это необходимо для выполнения условий договора об оказании услуг связи по запросу контрагента при обеспечении общего базового качества услуги.

Воздействие на сеть при помощи DPI-системы не ухудшает качество другим пользователям, однако выделяя «удобный» маршрут для транспортировки пакетов, можно гарантировать качество определенным пользователям на заданные виды сервисов.

Исходя из принципов сетевой нейтральности, принятых в Российской Федерации, оператор имеет право на управление трафиком как на меру по предоставлению специальных услуг с лучшим качеством в случаях, если абонент или контрагент в явном виде заявил о желании получать такие услуги, но при условии неухудшения уровня качества предоставляемых услуг для других абонентов и контрагентов, к чему мы и призываем, предлагая такой подход, как совместное использование технологий DPI и SDN. Это позволит оператору стать не только средством для передачи трафика через свою сеть,

но и извлечь практическую выгоду за счет предоставления дополнительных услуг.

#### Литература

1. Godlovitch I., Kotterink B., Markus D. Over-the-Top players (OTTs) // European Parliament's Committee. 2015. Pp. 20–42.
2. Миранчиндани П. SDN/NFV — Is it the breakthrough CSPs need to help level the OTT playing field? URL: <http://www.oneaccess-net.com/easyblog/entry/sdn-nfv-is-it-the-breakthrough-csps-need-to-help-level-the-ott-playing-field> (дата обращения: 17.11.2017).
3. Гольдштейн Б. С., Соколов Н. А., Яновский Г. Г. Сети связи. СПб: БХВ-Петербург, 2010. 400 с.
4. Елагин В. С., Онуфриенко А. В. Как оператору заработать на OTT-сервисах и при чем тут SDN? // Т-сomm: Телекоммуникации и транспорт. 2017. № 1. С. 17–21.
5. Зарубин А. А., Кызыуров О. Е., Савельева А. А. Цифровое качество программно-определяемых приложений инфокоммуникационных сетей. Формирование подходов к разработке моделей и методов его оценки // Информационные технологии и телекоммуникации. 2017. Т. 5. № 2. С. 56–61.
6. Makolkina M., Koucheryavy A., Paramonov A. Investigation of traffic pattern for the augmented reality applications // Lecture notes in computer science. 2017. Pp. 233–246.
7. Muthanna A., Masek P., Hosek J., Fujdiak R., Hussein O., Paramonov A., Koucheryavy A. Analytical evaluation of D2D connectivity potential in 5G wireless systems // Lecture notes in computer science. 2016. Pp. 395–403.
8. Slattery T. QoS in an SDN. URL: <http://www.nojitter.com/post/240168323/qos-in-an-sdn> (дата обращения: 16.11.2017).
9. Гольдштейн Б. С., Маршак М. А., Мишин Е. Д., Соколов Н. А., Тум А. В. Показатели функционирования мультисервисной сети связи общего пользования // Техника связи. 2009. № 3–4. С. 26–31.

10. Елагин В.С., Онуфриенко А.В. Технология глубокой инспекции пакетов в программно-конфигурируемой сети // Труды учебных заведений связи. 2016. № 2. С. 59–63.

11. Щербакова Е.Н. Актуальные вопросы построения сети связи общего пользования в России // Т-сomm: Телекоммуникации и транспорт. 2017. № 11. 2017. С. 17–21.

12. OTT — термины и понятия // ТелеМультиМедиа. URL: <http://old.telemultimedia.ru/art.php?id=593> (дата обращения: 10.12.2017).

13. Юдина А.В. Статистика / под. ред. Л.И. Александровой. URL: [http://abc.vvsu.ru/Books/statistika\\_up/page0010.asp](http://abc.vvsu.ru/Books/statistika_up/page0010.asp) (дата обращения: 27.11.2017).

14. Бриткин А. NFV и пример ее применения для оператора связи // Журнал сетевых решений LAN. 2014. № 10. С. 42–44.

15. Vladyko A., Muthanna A., Kirichek R. Comprehensive SDN testing based on model network // Lecture notes in computer science. 2016. Pp. 539–549.

16. Vladyko A., Letenko I., Llezhepekov A., Buinevich M. Fuzzy model of dynamic traffic management in software-defined mobile networks // Lecture notes in computer science. 2016. Pp. 561–570.

17. IPTV vs. OTT. Сделайте свой выбор. URL: <https://nag.ru/news/press-release/23272/iptv-vs-ott-sdelayte-svoiyvyibor-.html> (дата обращения: 20.11.2017).

## DPI-SYSTEMS FOR TRAFFIC IDENTIFICATION AND QUALITY ASSURANCE OF OTT-SERVICES

### VASILY S. ELAGIN,

St. Petersburg, Russia, elagin.vas@gmail.com

### ANTON A. ZARUBIN,

St. Petersburg, Russia, azarubin@sut.ru

### ANASTASIA V. ONUFRIENKO,

St. Petersburg, Russia, anastasia.4991@mail.ru

**KEYWORDS:** OTT; OTT-service; Deep Packet Inspection; Software Defined Network; QoS; Quality of service.

### ABSTRACT

In this work, the authors introduce the definition of the term OTT-service, describe the services and comparisons with traditional services. The classification of services provided by OTT-services is shown.

The authors indicate the main characteristics necessary to ensure a given quality of service in the transmission and transmission of traffic of different types.

OTT-services in the Russian market. Indicates different traffic prioritization classes based on the requirements and behavior of certain types of data, allowing for maximum flexibility in the transmission of user information. Interaction with QoS when providing resources of its network for OTT-services.

The authors consider the possibilities of using the DPI-system on the network and its interaction with OTT-services based on open solu-

tions. In this paper, we study block diagrams of OTT traffic recognition signatures. The graphs of the results of the experiment and the analysis of the working capacity of signatures obtained for estimating the probability of events and applied for adequate statistical analysis are obtained.

The results of the investigation of signals for OTT-services of different types of traffic for further research and prospects for the introduction of technologies are summarized. The problems associated with the use of DPI are indicated, and the solutions are given.

### REFERENCES

1. Godlovitch I., Kotterink B., Markus D. Over-the-Top players (OTTs). *European Parliament's Committee*. 2015. Pp. 20–42.

2. Miranchindani P. *SDN/NFV – Is it the breakthrough CSPs need to help level the OTT playing field?* URL: <http://www.oneaccess-net.com/easyblog/entry/sdn-nfv-is-it-the-breakthrough-csps-need-to-help-level-the-ott-playing-field> (date of access: 17.11.2017).
3. Gol'dshtejn B.S., Sokolov N.A., Janovskij G.G. *Seti svjazi* [Communication networks]. St. Petersburg: BHV-Peterburg, 2010. 400 p.
4. Elagin V.S., Onufrienko A.V. How can an operator earn on OTT services and what does SDN? *T-comm*. 2017. No. 1. 2017. Pp. 17-21. (In Russian)
5. Zarubin A.A., Ksyurov O.E., Saveleva A.A. Digital quality of software-defined applications of infocommunication networks. Formation of approaches to the development of models and methods for its evaluation. *TelecomIT*. 2017. Vol. 5. No. 2. Pp. 56-61. (In Russian)
6. Makolkina M., Koucheryavy A., Paramonov A. Investigation of traffic pattern for the augmented reality applications. *Lecture notes in computer science*. 2017. Pp. 233-246.
7. Muthanna A., Masek P., Hosek J., Fujdiak R., Hussein O., Paramonov A., Koucheryavy A. Analytical evaluation of D2D connectivity potential in 5G wireless systems. *Lecture notes in computer science*. 2016. Pp. 395-403.
8. Slattery T. *QoS in an SDN*. URL: <http://www.nojitter.com/post/240168323/qos-in-an-sdn> (date of access: 16.11.2017).
9. Goldstein B.S., Marshak M.A., Mishin E.D., Sokolov N.A., Tum A.V. Performance indicators of a multiservice public communication network. *Tekhnika svyazi* [Communication Engineering]. 2009. No. 3-4. Pp. 26-31. (In Russian)
10. Elagin V.S., Onufrienko A.V. Technology of deep packet inspection in a software-configurable network. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2016. No. 2. Pp. 59-63. (In Russian)
11. Shcherbakova E.N. Topical issues of construction of public communication network in Russia. *T-comm*. 2017. No. 11. Pp. 17-21. (In Russian)
12. OTT – terminy i ponjatija [OTT – terms and concepts]. *TeleMultiMedia*. URL: <http://old.telemultimedia.ru/art.php?id=593> (date of access: 10.12.2017). (In Russian)
13. Judina A.V. *Statistika* [Statistics]. URL: [http://abc.vvsu.ru/Books/statistika\\_up/page0010.asp](http://abc.vvsu.ru/Books/statistika_up/page0010.asp) (date of access: 27.11.2017). (In Russian)
14. Britkin A. NFV I primer ee primeneniya dlyaoperatora cyazi [NFV and an example of its application for a telecom operator]. *Zhurnal setevykh reshenii LAN* [Journal of Network Solutions LAN]. 2014. No. 10. Pp. 42-44. (In Russian)
15. Vladyko A., Muthanna A., Kirichek R. Comprehensive SDN testing based on model network. *Lecture notes in computer science*. 2016. Pp. 539-549.
16. Vladyko A., Letenko I., Llezhepekov A., Buinevich M. Fuzzy model of dynamic traffic management in software-defined mobile networks. *Lecture notes in computer science*. 2016. Pp. 561-570.
17. *IPTV vs. OTT. Sdelajte svoj vybor* [IPTV vs. OTT. Make the choice]. URL: <https://nag.ru/news/press-release/23272/iptv-vs-ott-sdelayte-svoy-vyibor-.html> (date of access 20.11.2017). (In Russian)

**INFORMATION ABOUT AUTHORS:**

Elagin V.S., PhD, Associate Professor of the Infocommunication Systems Department, Federal State Educational Budget-Financed Institution of Higher Education The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications;  
 Zarubin A.A., PhD, Associate Professor of the Infocommunication Systems Department, Federal State Educational Budget-Financed Institution of Higher Education The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications;  
 Onufrienko A.V., Master Student, Federal State Educational Budget-Financed Institution of Higher Education The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications.

---

**For citation:** Elagin V.S., Zarubin A.A., Onufrienko A.V. Efficiency of DPI-system for traffic identification and maintenance of OTT-services quality. *H&ES Research*. 2018. Vol. 10. No. 3. Pp. 40-53. doi: 10.24411/2409-5419-2018-10074 (In Russian)

doi: 10.24411/2409-5419-2018-10075

# РЕАЛИЗАЦИЯ КОНЦЕПЦИИ ПО ПОДДЕРЖАНИЮ В РАБОТОСПОСОБНОМ СОСТОЯНИИ СУЩЕСТВУЮЩИХ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ БЛИЖНЕЙ НАВИГАЦИИ И ПОСАДКИ

**КОТОВ**

**Валентин Сергеевич<sup>1</sup>**

**РЕЗНИКОВА**

**Римма Константиновна<sup>2</sup>**

**МОРИН**

**Александр Александрович<sup>3</sup>**

## Сведения об авторах:

<sup>1</sup>к.т.н., преподаватель кафедры электроэнергетических систем кораблей Военного института Военного учебно-научного центра Военно-морского флота «Военно-морская академия им. Адмирала Флота Советского Союза Н.Г. Кузнецова», г. Пушкин, г. Санкт-Петербург, Россия, legkieshagi@ya.ru

<sup>2</sup>к.т.н., старший преподаватель кафедры морально-психологического обеспечения Военного учебно-научного центра Военно-морского флота «Военно-морская академия им. Адмирала Флота Советского Союза Н.Г. Кузнецова», г. Санкт-Петербург, Россия, legkieshagi@yandex.ru

<sup>3</sup>студент Балтийского государственного технического университета «Военмех» им. Д.Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург, Россия, morin.alexandr@mail.ru

## АННОТАЦИЯ

Работа посвящена вопросу совершенствования и модернизации национальной системы ближней навигации на примере радиоприемного устройства, являющегося частью системы «Тропа-СМД». Азимутально-дальномерные радиомаяки «Тропа-СМД» предназначены для модернизации аэродромов военных ведомств, аэродромов совместного базирования, а также для установки на морские суда малого и среднего водоизмещения. Они предназначены для работы с бортовым оборудованием радиотехнических систем ближней навигации третьего и последующих поколений, а так же в международном диапазоне частот и необходимы для перевода существующих средств навигации в международный диапазон частот в соответствии с принятыми Россией обязательствами по выполнению требований Международного регламента радиосвязи.

В работе приведено описание программно-аппаратного обеспечения для проверки изделия на соответствие техническим условиям современных навигационных систем, проведен анализ результатов исследования параметров системы «Тропа-СМД» на соответствие требованиям к техническим устройствам, а именно: измерение чувствительности радиоприемника; измерение ослабления  $X$  чувствительности; измерение уровня восприимчивости по блокированию; измерение уровня чувствительности и динамического диапазона по перекрестным помехам; измерение динамического диапазона по интермодуляции; измерение уровня чувствительности по побочным каналам приема. Исследование проводилось с помощью испытательного стенда, на котором производилась оценка параметров приемного устройства азимутально-дальномерного радиомаяка «Тропа». Для управления стендом была разработана программа Trail Measurment. Программа написана на языке C#.

Программа является объектно-ориентированной. При разработке были созданы классы управления приборами, классы для проведения измерений, а также класс для калибровки порогов обнаружения.

Результаты исследования параметров приемника представлены графиками и в виде таблиц.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** автоматизация; радиоприемные устройства; системы измерения; «Тропа-СМД»; оценка параметров; приемное устройство; азимутально-дальномерные радиомаяки «Тропа».

**Для цитирования:** Котов В.С., Резникова Р.К., Морин А.А. Реализация концепции по поддержанию в работоспособном состоянии существующих радиотехнических систем ближней навигации и посадки // Научно-технические исследования в космических исследованиях Земли. 2018. Т. 10. № 3. С. 54-63. doi: 10.24411/2409-5419-2018-10075



## Введение

В 2000 году в Министерстве обороны Российской Федерации была разработана «Концепция поддержания в работоспособном состоянии существующих радиотехнических систем ближней навигации (РСБН) и посадки ВВС и освобождения диапазона частот для развития телевидения и сотовых систем связи». Эта концепция была основана на том, что единое радионавигационное поле систем РСБН создается и используется как в мирное, так и в военное время летательными аппаратами всех ведомств. Замысел Министерства обороны Российской Федерации был реализован в виде современного вооружения и военной техники, средств радионавигации, успешно решен вопрос разработки радиомаяков, а именно радиоприемного устройства АДРМ «Тропа» [1].

В настоящее время 11 аэродромов Министерства обороны Российской Федерации оборудованы модернизированными радиотехническими системами ближней навигации РСБН-4НМ, 15 аэродромов посадочными радиомаячными группами ПРМГ-76УМ, 3 аэродрома азимутально-дальномерными маяками «Тропа-СМД» [3].

Азимутально-дальномерные маяки (АДРМ) «Тропа-СМД» — это новое поколение наземных средств ближней навигации, работающее с бортовым оборудованием системы РСБН III-го и последующих поколений, которые функционируют в международном диапазоне частот.

В соответствии с принятыми Россией обязательствами по выполнению требований Международного регламента радиосвязи АДРМ «Тропа-СМД» переводят существующие средства навигации в международный диапазон частот. Радиомаяк «Тропа-М» разработан в морском исполнении для установки на кораблях с одиночным базированием летательных аппаратов [5].

АДРМ обеспечивает выдачу и прием цифровой информации для дистанционного включения/выключения АДРМ и контроля его состояния, а также цифровой информации о координатах, взаимодействующих с АДРМ летательных аппаратов, со среднеквадратической погрешностью: по азимуту —  $1,5^\circ$ ; по дальности — 80 м.

АДРМ «Тропа-СМД» при сохранении функции ответа наземной индикации (аналогично вторичной радиолокации) и линии передачи данных, а также характеристик точности и зон действия, имеет на порядок меньшее энергопотребление по сравнению с эксплуатируемыми в настоящее время радиомаяками.

Современные навигационные системы с точки зрения программно-аппаратного обеспечения требуют повышенного внимания.

## 1. Постановка задачи

Одним из этапов разработки изделия является проверка изделия на соответствие техническим условиям

(ТУ). В работе проводились исследования на соответствие требованиям ТУ следующих параметров приемника:

1. Чувствительность  $N_{\min}$  должна быть не хуже минус 94 дБм, при:
  - 1.1. Вероятности обнаружения сигнала 0,99.
  - 1.2. Вероятности ложной тревоги от 0,01 до 0,015.
2. Ослабление  $X$  чувствительности  $N_{\min}$  на частоте  $f$  должно быть не менее  $[X = N(f)_{\min} - N(f_0)_{\min}]$  дБ:
  - 2.1.  $X_1 = 50$  дБ при отстройке от  $F_0$  на  $\pm 2$  МГц для «700 МГц» и  $F_0 \pm 2,8$  МГц для «900 МГц».
  - 2.2.  $X_{2м} = 70$  дБ в диапазонах частот от  $0,8F_0$  до  $0,95F_0$  и от  $1,05F_0$  до  $1,2F_0$ .
3. Уровень восприимчивости по блокированию и перекрестным искажениям  $N_1$  на частотах  $0,8F_0$  и  $1,2F_0$  должен быть не менее 0 дБм при ухудшении чувствительности не более 10 дБ.
4. Уровень восприимчивости по каналам побочного приема  $N_2$ , включая зеркальные каналы, в диапазоне частот от  $0,2F_0$  до  $0,8F_0$  и от  $1,2F_0$  до  $5,0F_0$  должен быть не менее 0 дБм.
5. Динамический диапазон по выходу при блокировании или действии перекрестных помех  $D_1$  на частотах  $0,95F_0$  и  $1,05F_0$  должен быть не менее 70 дБ.
6. Динамический диапазон по выходу при интермодуляции  $D_2$  в диапазоне частот от  $0,8F_0$  до  $0,95F_0$  и от  $1,05F_0$  до  $1,2F_0$  должен быть не менее 60 дБ.

Таблица 1

Условные обозначения параметров приемника из техническим условиям

№ п/п	Обозначения	Пояснение
1	$F_0$	Центральная частота
2	$f$	Частота
3	$N_{\min}$	Чувствительность
4	$X$	Ослабление
5	$N_1$	Уровень восприимчивости по блокированию и перекрестным искажениям
6	$N_2$	Уровень восприимчивости по каналам побочного приема
7	$D_1$	Динамический диапазон по выходу при блокировании или действии перекрестных помех
8	$D_2$	Динамический диапазон по выходу при интермодуляции

Исследование проводилось согласно ГОСТ РВ 5801–001–2008 (Радиоприемники. Требования к частотной избирательности), а также ГОСТ РВ 5801–002–2008 (Устройства радиоприемные. Методы измерений и контроля уровней восприимчивости по побочным каналам приема).

На рис. 1 приведена схема испытательного стенда, с помощью которого производилась оценка параметров приемного устройства АДРМ «Тропа».

- Хаб — Ethernet хаб, обеспечивающий обмен информацией между устройствами;
- ПК — персональный компьютер;
- ГСВЧ № 1 — генератор СВЧ R&S SMB100A;
- ГСВЧ № 2 — генератор СВЧ R&S SMB100A;
- АТТ № 1 — сменный внешний аттенуатор;
- АТТ № 2 — сменный внешний аттенуатор;
- ПУ «Тропа» (Канал 700) — входной канал испытываемого устройства, предназначенный для приема сигналов, частотой 700–800 МГц;
- ПУ «Тропа» (Канал 900) — входной канал испытываемого устройства, предназначенный для приема сигналов, частотой 900–1000 МГц.

Общее управление стендом производит ПК. Все элементы стенда, которые требуют сопряжения с ПК, подключены к нему посредством Ethernet хаба.

Генераторы СВЧ необходимы для создания испытательных сигналов, которые имитируют помеху либо полезный сигнал. Генераторы могут работать как попеременно, так и одновременно (например, имитируя зашумленный сигнал).

Сумматор необходим для суммирования сигналов двух СВЧ генераторов, а также для обеспечения развязки между ними. Выход сумматора подключен к СВЧ входам ПУ «Тропа».

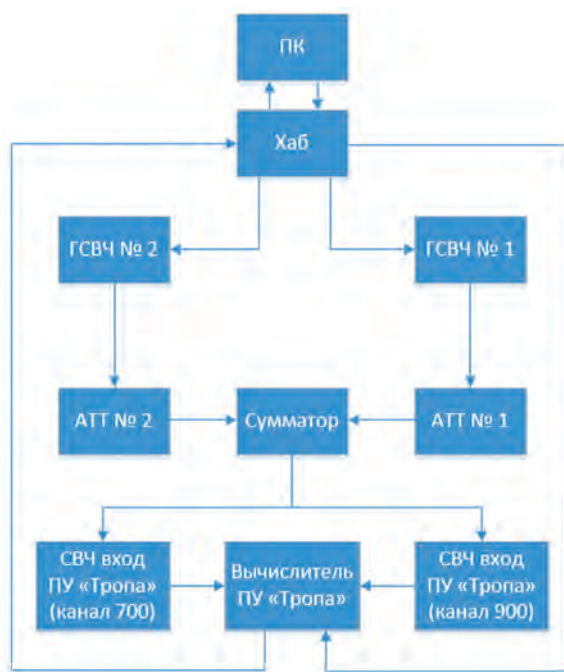


Рис. 1. Испытательный стенд оценки параметров приемного устройства АДРМ «Тропа»

Вычислитель ПУ «Тропа» отвечает за управление ПУ «Тропа». В частности, имеется возможность произвести запуск подсчета количества радиоимпульсов, принятых приемником за установленное время (т.н. измерительное окно). Настройка и обмен данными между ПК и вычислителем ПУ «Тропа» производится посредством Ethernet через Ethernet хаб.

## 2. Описание программного обеспечения

Для управления измерительным стендом, была разработана программа Trail Measurement. Программа написана на языке C#.

Программа является объектно-ориентированной. При разработке были созданы классы управления приборами, классы для проведения измерений, а также класс для калибровки порогов обнаружения УП.

Ниже приведено краткое описание классов, входящих в состав приложения:

- *Класс Thresholds\_Calibrator* — предназначен для настройки первичного шумового порога обнаружения УП (далее, порог обнаружения).

Критерием являются заданные минимальный и максимальный пороги вероятности ложной тревоги.

### – Классы для управления приборами

Для управления приборами в состав программы входят два класса:

1. UPX — предназначен для управления, а также для чтения регистров УП тропа посредством интерфейса UPX

2. Generator предназначен для управления СВЧ генераторами и создан с использованием библиотеки NI-VISA. Работоспособность данного класса проверена с использованием генераторов R&S SMB100A и R&S SMC100A. Класс включает следующие методы:

1. bool errors()  
//Проверка стека ошибок прибора. Если стек пуст, то возвращает false
2. void connect(string address = "")  
//Произвести соединение с прибором по указанному IP адресу
3. void RF\_ON()  
//Подать СВЧ мощность на выход RF
4. void RF\_OFF()  
//Убрать мощность на выходе RF
5. void RF\_SET\_FREQ(ulong freq)  
//Установка частоты сигнала
6. void RF\_SET\_LEVEL(double level)  
//Установка уровня мощности на выходе RF
7. void PULM\_MOD\_CONFIG(uint period, uint width, timeUnits period\_unit, timeUnits width\_unit, PULM\_TRIG\_MODE trig\_mode)  
/\*Настройка параметров внутренней импульсной модуляции. В качестве параметров указаны, соответственно:

период следования импульсов, длительность импульсов, единицы измерения периода, единицы измерения длительности импульсов, режим работы триггера\*/

8. void PULM\_MOD\_ON()  
//Включение импульсной модуляции
9. void PULM\_MOD\_OFF()  
//Выключение импульсной модуляции
10. void mod\_of()  
//Выключение любой модуляции прибора
11. void disconnect()//Прекратить соединение с прибором.

## 2.1. Измерение чувствительности радиоприемника

Чувствительность радиоприемника — мера способности радиоприемника обеспечивать прием слабых радиосигналов, определяемая минимальным уровнем полезного радиосигнала на его входе при заданном отклике или показателе качества функционирования [6].

Определение чувствительности приемника АДРМ «Тропа» проводилось по следующему алгоритму:

1. Начальные настройки. Задаются: минимальная и максимальная мощность генерации СВЧ мощности, параметры модуляции генератора СВЧ, частота несущей СВЧ сигнала.
2. Настойка УП. При этом производится выбор частотного канала приема и величина измерительного окна для подсчета количества принятых импульсов
3. Настройка генератора СВЧ. Производится настройка несущей частоты испытательного сигнала, а также тип и параметры модуляции испытательного сигнала.
4. Вычисляется среднее количество ложных тревог за время измерительного окна. Для этого производится подсчет количества принятых УП импульсов, при отсутствии сигнала на входе.
5. Подача сигнала на вход УП. При этом устанавливается максимальная заданная мощность сигнала.
6. Запуск подсчета количества импульсов, принятых УП Тропа.
7. Запрос УП о количестве обнаруженных импульсов.
8. Сравнение количество обнаруженных импульсов минус количество ложных тревог с количеством сформированных генератором СВЧ за время измерительного окна.
9. Если количество обнаруженных импульсов больше, чем 90% от количества импульсов, сформированных генератором СВЧ за время измерительного окна, то принять текущее значение мощности в качестве результата и переход к пункту № 19. Если меньше, чем 89%, то переход к пункту № 10.
10. Подача сигнала на вход УП. При этом устанавливается минимальная заданная мощность.

11. Включение измерительного режима на УП Тропа
12. Запрос на УП о количестве обнаруженных импульсов.

13. Если количество обнаруженных импульсов меньше, чем 89% от количества импульсов, сформированных генератором СВЧ за время измерительного окна, то принять текущее значение мощности в качестве результата и переход к пункту № 19. Если больше, чем 90%, то переход к пункту № 14.

14. Подача сигнала на вход УП. При этом устанавливается значение мощности, равное  $\frac{P_{\max} + P_{\min}}{2}$ .

15. Включение измерительного режима на УП Тропа.

16. Запрос на УП о количестве обнаруженных импульсов.

17. Если количество обнаруженных импульсов меньше, чем 89% от количества импульсов, сформированных генератором СВЧ за время измерительного окна, то принять в качестве значения  $P_{\max}$  принимается значение, равное  $\frac{P_{\max} + P_{\min}}{2}$ , переход к пункту № 10.

Если количество обнаруженных импульсов больше, чем 90% от количества импульсов, сформированных генератором СВЧ за время измерительного окна, то принять в качестве значения  $P_{\min}$  значение, равное  $\frac{P_{\max} + P_{\min}}{2}$ . Далее переход к пункту № 10.

18. Принять в качестве результата текущее значение мощности.

19. Конец.

В ходе данного исследования было установлено, что требование ТУ к чувствительности выполняется. УП способно производить прием сигналов, мощностью — 97 дБм при вероятности ложной тревоги, равной 0,012 при заданных ТУ требованиях в — 94 дБм и вероятности ложной тревоги в пределах от 0,01 до 0,015.

## 2.2. Измерение ослабления X чувствительности

Избирательность — это способность радиоприемника подавлять сигналы за пределами полосы приема полезного сигнала [6].

Измерение ослабления X чувствительности ПУ «Тропа» проводилось путем определения чувствительности приемника в различных точках заданного частотного диапазона с заданным шагом перестройки по частоте испытательного СВЧ сигнала. Исследование производилось по следующему алгоритму:

1. Начальные настройки. Задаются: минимальная и максимальная мощность СВЧ сигнала, параметры модуляции генератора испытательного СВЧ, полоса частот для определения избирательности, шаг перестройки по частоте генератора СВЧ.

2. Настойка УП. При этом производится выбор частотного канала приема и величина измерительного окна.

3. В качестве текущей частоты генерации СВЧ принимается минимальная частота в полосе исследуемых частот.

4. Настройка генератора СВЧ. Задается текущая частота генерации, а также тип и параметры модуляции испытательного сигнала.

5. Определение чувствительности при данных настройках УП и при данной частоте генерации СВЧ мощности с помощью алгоритма описанного в пункте 6.3.

6. Записать в результат значения частоты генерации СВЧ и чувствительности, определенные в пункте № 5.

7. Увеличение текущей частоты генерации СВЧ мощности на заданный шаг перестройки по частоте. Если значение текущей частоты меньше максимальной частоты в полосе исследуемых частот, то переход к пункту № 4.

8. Производится проверка того, не выходит ли значение полученной чувствительности УП при отстройке на частоту, большую, или равную X1 за допустимые пределы.

9. Производится проверка того, не выходит ли значение полученной чувствительности УП при отстройке на частоту, большую, или равную X2 за допустимые пределы.

10. Конец.

В ходе исследования было установлено, что ослабления X1 и X2 чувствительность приемника находятся в допустимых пределах. Точное значение ослабления установить не удалось ввиду того, что при подаче на вход максимально допустимой мощности, приемник не фиксирует входной сигнал (рис. 2).

### 3. Измерение уровня восприимчивости по блокированию

Уровень восприимчивости по блокированию — это минимальный уровень блокирующей радиопомехи на входе радиоприемника, при которой коэффициент блокирования, или показатель качества функционирования равен заданному значению [6].

В данном испытании используются два генератора СВЧ. Один из них имитирует непрерывную помеху, а другой полезный сигнал.

В качестве результата измерения принимается разница чувствительности приемника при воздействии блокирующей помехи и при её отсутствии.

Алгоритм измерения:

1. Начальные настройки. Задаются: минимальная и максимальная мощность генерации «полезного» сигнала, тип и параметры модуляции генератора СВЧ, относительная отстройка помехи по отношению к основному каналу приема.

2. Настойка УП. При этом производится выбор частотного канала приема и величина измерительного окна.

3. Настройка СВЧ генератора, имитирующего полезный сигнал. Устанавливаются: тип и параметры модуляции. Частота генерации устанавливается равной частоте приема на выбранном частотном канале УП.

4. Производится определение чувствительности УП.

5. Настройка СВЧ генератора помехи. Частота генерации устанавливается равной следующему значению  $f_0 * (1 + d)$ , где  $f_0$  — частота приема для выбранного канала УП,  $d$  — величина относительной отстройки сигнала

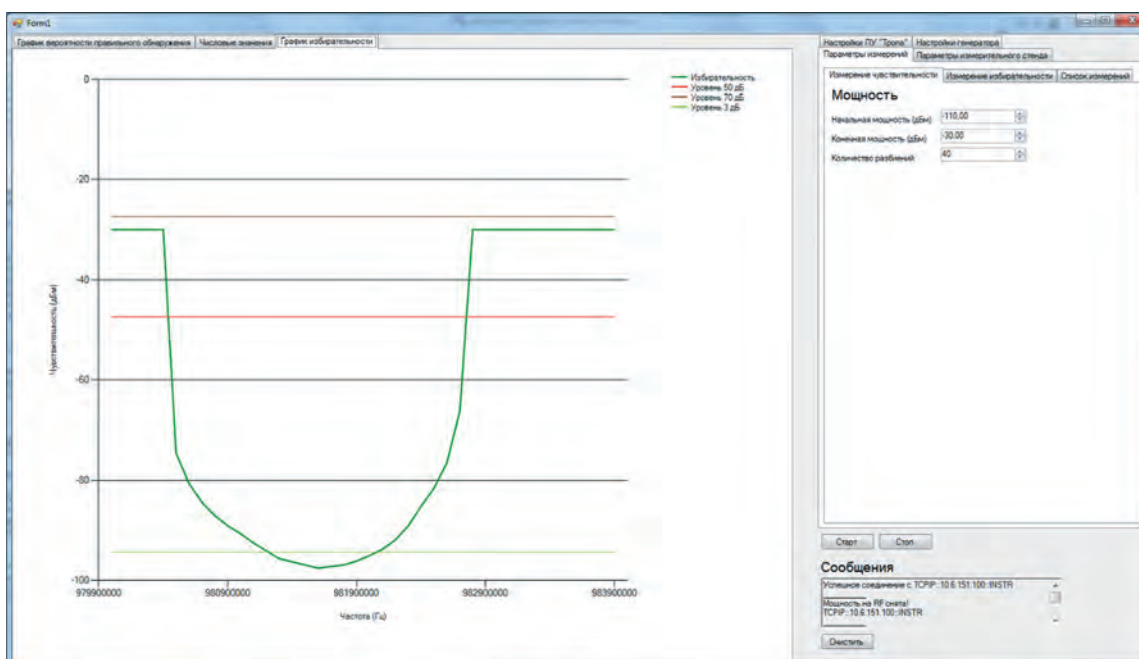


Рис. 2. Измерения избирательности для одного из каналов



помехи относительно частоты приема на выбранном канале УП.

6. Подача СВЧ мощности помехового сигнала на вход УП. Мощность выбирается равной пороговой чувствительности, измеренной в пункте № 4 плюс 60 дБ.

7. Определение пороговой чувствительности УП. Запись в результат.

8. Настройка СВЧ генератора помехи. Частота генерации устанавливается равной следующему значению  $f_0 * (1 - d)$ .

9. Определение пороговой чувствительности УП. Запись в результат.

10. Конец.

В результате данного исследования было установлено, что чувствительность УП, при воздействии блокирующей помехи мощностью  $-37$  дБм, составляет  $-90$  дБм, без воздействия помехи  $-97$  дБм. Т.е. в результате воздействия блокирующей помехи произошло ухудшение чувствительности УП на  $7$  дБ, что удовлетворяет требованиям ТУ.

#### 4. Измерение уровня чувствительности и динамического диапазона по перекрестным помехам

Уровень восприимчивости по перекрестным помехам — это минимальный уровень модулирующей радиопомехи на входе радиоприемника, при котором коэффициент перекрестных искажений, или показатель качества функционирования равен заданному значению [6].

В данном испытании используются два генератора СВЧ. Один из них имитирует импульсную помеху, а другой полезный сигнал.

В качестве результата измерения принимаются значения пороговой чувствительности при действии шумовой импульсной помехи при нижней и при верхней отстройке по частоте.

Алгоритм измерения:

1. Начальные настройки. Задаются: минимальная и максимальная мощность генерации «полезного» сигнала, тип и параметры модуляции «полезного» сигнала, относительная отстройка помехи по отношению к основному каналу приема, тип и параметры модуляции сигнала, имитирующего помеху

2. Настойка УП. При этом производится выбор частотного канала приема и величина измерительного окна

3. Настройка СВЧ генератора, имитирующего полезный сигнал. Устанавливаются: тип и параметры модуляции сигнала. Частота генерации сигнала устанавливается равной частоте приема на выбранном частотном канале УП.

4. Производится определение чувствительности УП с помощью алгоритма, описанного в пункте 6.3.

5. Настройка СВЧ генератора, имитирующего сигнал помехи. Устанавливаются: тип и параметры модуляции сигнала. Частота генерации устанавливается равной значению

$f_0 * (1 + d)$ , где  $f_0$  — частота приема для выбранного канала УП,  $d$  — величина относительной отстройки сигнала помехи относительно частоты приема на выбранном канале УП

6. Подача смеси сигналов помехи и полезного сигнала на вход УП. Мощность помехи выбирается равной пороговой чувствительности, измеренной в пункте № 4 плюс  $70$  дБ.

7. Определение пороговой чувствительности УП.

8. Подача сигнала помехи на вход УП без подачи полезного сигнала.

9. Определение пороговой чувствительности.

10. Настройка СВЧ генератора помехи. Устанавливаются: тип и параметры модуляции. Частота генерации устанавливается равной следующему значению  $f_0 * (1 - d)$ .

11. Подача смеси сигналов помехи и полезного сигнала на вход УП. Мощность помехи выбирается равной пороговой чувствительности, измеренной в пункте № 4 плюс  $70$  дБ.

12. Определение пороговой чувствительности УП.

13. Конец.

В результате исследования установлено, что чувствительность УП, при воздействии перекрестных помех мощностью  $-27$  дБм, составляет  $-92$  дБм, без воздействия помехи  $-97$  дБм. Т.е. в результате воздействия блокирующей помехи произошло ухудшение чувствительности УП на  $5$  дБ, что удовлетворяет требованиям ТУ. При мощности входной помехи, на  $70$  дБ превышающей чувствительность радиоприемника, составляющей  $-97$  дБм, невозможно принять испытательный сигнал, имитирующий помеху с вероятностью правильного обнаружения равной  $0,99$  при вероятности ложной тревоги от  $0,01$  до  $0,015$ . Т.е. динамический диапазон по перекрестным помехам превышает  $70$  дБ (рис. 3).

#### 5. Измерение динамического диапазона по интермодуляции

Уровень восприимчивости по интермодуляции — это минимальный уровень двух одинаковых по величине интермодулирующих радиопомех на входе радиоприемника, при котором коэффициент интермодуляции, или показатель качества функционирования равен заданному значению [6].

В данном измерении используется два генератора СВЧ. Один из них имитирует импульсную помеху, а другой непрерывную.

Результатом измерения является наименьшее значение чувствительности, выявленное на всех возможных побочных каналах по интермодуляции.

Алгоритм измерения:

1. Измерение уровня чувствительности приемника, аналогично пункту 6.3.

2. Начальные настройки. Задаются: минимальная и максимальная мощность генерации, тип и параметры

модуляции сигнала, имитирующего импульсную помеху, относительная отстройка импульсной помехи по отношению к основному каналу приема.

3. Аналитический расчет частот, на которых может наблюдаться явление интермодуляции при заданной относительной отстройке частоты импульсной помехи относительно основного канала приема.

4. Расчет данных частот ведется по формулам.

$$5. F_n = \frac{F_n + k * F_0}{n}, 1 < n < k, k = 2 \dots 5.$$

При  $F_n = (1 + G) * F_0$

$$6. F_n = \frac{F_n + n * F_0}{n}, 1 < n < k, k = 2 \dots 5.$$

При  $F_n = (1 - G) * F_0,$

где  $F_n$  — частота сигнала, имитирующего непрерывную помеху,  $F_n$  — частота сигнала, имитирующего импульсную помеху,  $G$  — величина относительной отстройки от  $F_0, F_0$  — частота основного канала приема.

7. Настойка УП. При этом производится выбор частотного канала приема и величина измерительного окна.

8. Настройка СВЧ генератора, имитирующего сигнал импульсной помехи. Частота генерации устанавливается равной значению  $f_0 * (1 + d)$ , где  $f_0$  — частота приема для выбранного канала УП,  $d$  — величина относительной отстройки сигнала помехи относительно частоты приема на выбранном канале УП.

9. Определение чувствительности УП при всех возможных вариантах настройки частоты генератора, имитирующего непрерывную помеху, при которых может наблюдаться явление интермодуляции.

10. Настройка СВЧ генератора, имитирующего сигнал импульсной помехи. Частота генерации устанавливается равной значению  $f_0 * (1 - d)$ , где  $f_0$  — частота приема для выбранного канала УП,  $d$  — величина относительной отстройки сигнала помехи относительно частоты приема на выбранном канале УП.

11. Определение чувствительности УП по интермодуляции при всех возможных вариантах настройки частоты генератора, имитирующего непрерывную помеху, при которых может наблюдаться явление интермодуляции.

12. В качестве результата берется отношение чувствительности радиоприемника к наименьшему измеренному значению пороговой чувствительности по интермодуляции.

13. Конец.

В результате исследования установлено, что при мощности входной помехи, на 60 дБ превышающей чувствительность радиоприемника, составляющей — 97 дБм, невозможно принять испытательный сигнал, имитирующий помеху с вероятностью правильного обнаружения равной 0,99 при вероятности ложной тревоги от 0,01 до 0,015. Т.е. динамический диапазон по интермодуляции превышает 60 дБ.

6. Измерение уровня чувствительности по побочным каналам приема

Уровень восприимчивости по побочному каналу приема — это минимальный уровень радиопомехи на вхо-

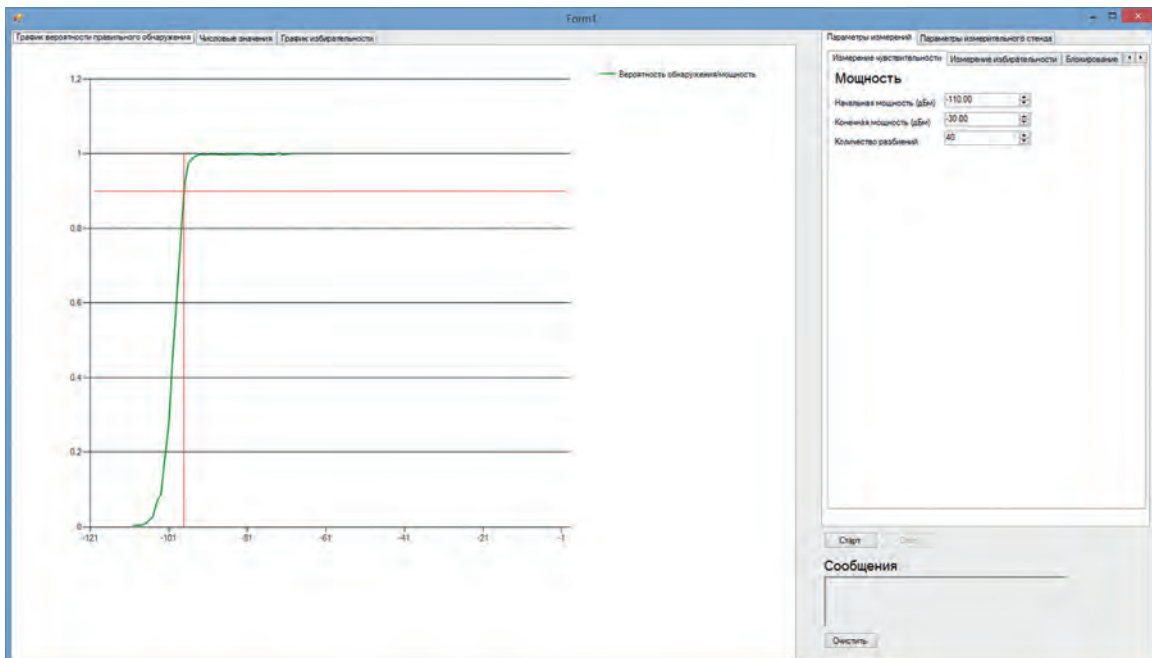


Рис. 3. Измерение вероятности правильного обнаружения от величины подаваемой мощности для одного из каналов

де радиоприемника, при котором коэффициент прохождения по побочному каналу приема, или показатель качества функционирования равен заданному значению [6].

В данном измерении используется два генератора СВЧ. Один из них имитирует импульсную помеху, а другой непрерывную.

Алгоритм измерения:

1. Начальные настройки. Задаются: мощность сигналов, тип и параметры модуляции генератора импульсной помехи, шаг перестройки по частоте непрерывной помехи.

2. Настойка УП. При этом производится выбор частотного канала приема и величина измерительного окна.

3. Настройка генератора СВЧ импульсной помехи. Мощность генерации устанавливается равной заданной в пункте № 1. При этом частота генерации берется равной следующему значению  $f_0 * (1 + d)$ , где  $f_0$  — частота приема для выбранного канала УП;  $d$  — величина относительной отстройки сигнала помехи относительно частоты приема на выбранном канале УП.

4. Настройка генератора СВЧ непрерывной помехи. Мощность генерации устанавливается равной заданной в пункте № 1. Частота генерации берется равной следующему значению  $f_0 * (1 + d) - s$ , где  $s$  — величина шага перестройки по частоте.

5. Если текущая частота настройки меньше, чем  $0.2 * f_0$ , то переход к пункту № 10.

6. Подача СВЧ мощности непрерывной и импульсной помех.

7. Определение вероятности ложной тревоги. Это делается в следующем порядке:

8. Включение измерительного режима УП.

9. Запрос на УП о количестве обнаруженных импульсов.

10. Запрос на УП о длительности принятия решений. То есть периода времени при котором было принято решение о том, что на входе УП сигнал есть.

11. Расчет вероятности ложной тревоги по формуле:

$$P = \frac{N_0 * T_n}{T},$$

где  $P$  — вероятность ложной тревоги;  $N_0$  — общее количество обнаруженных импульсов на входе УП;  $T$  — время принятия решений;  $T_n$  — период следования импульсов.

12. Запись в результат текущего значения частоты непрерывной помехи, а также вероятности ложной тревоги, определенной в пункте № 7.

13. Декремент текущей частоты настройки генератора непрерывной помехи на величину шага перестройки по частоте. Если текущая частота настройки больше, чем  $0.2 * f_0$ , то переход к пункту № 6.

14. Настройка генератора СВЧ непрерывной помехи. Мощность генерации устанавливается равной заданной в пункте № 1. Частота генерации берется равной следующему значению  $f_0 * (1 + d) + s$ , где  $s$  — величина шага перестройки по частоте.

15. Если текущая частота настройки больше, чем  $5 * f_0$ , то переход к пункту № 15.

16. Подача мощности непрерывной и импульсной помех.

17. Определение вероятности ложной тревоги. Аналогично пункту № 7.

18. Инкремент текущей частоты настройки генератора непрерывной помехи на величину шага перестройки по частоте. Если текущая частота настройки меньше, чем  $5 * f_0$ , то переход к пункту № 12.

19. Конец.

В результате исследования установлено, что при приеме сигнала помехи мощностью 0 дБм по каналам побочного приема, включая зеркальный, данный сигнал может быть принят с вероятностью значительно ниже 0,99 при вероятности ложной тревоги от 0,01 до 0,015.

Использование данных спутниковых радионавигационных систем и создание единого навигационно-информационного поля локальной радиотехнической системы на базе отечественной (РСБН/ПРМГ) и зарубежной (ДМЕ/ТАСАН) логично и является продолжением процесса совершенствования и модернизации национальной системы ближней навигации [2–3]. Перспективная многофункциональная локальная радиотехническая система может явиться основой возрождения единого навигационного поля для авиации всех ведомств Российской Федерации и достижения требуемых для обеспечения высокого уровня безопасности полетов точности, непрерывности и целостности навигационных определений летательных аппаратов [2].

## Литература

1. Постановление Правительства РФ от 22.02.2000 N144 "Об утверждении Концепции модернизации и развития Единой системы организации воздушного движения Российской Федерации" // Консультант Плюс. URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_26256/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_26256/) (дата обращения: 11.09.2017).

2. Распоряжение Правительства РФ от 9 июля 2014 г. № 1250-р «О плане мероприятий по обеспечению повышения производительности труда, создания и модернизации высокопроизводительных рабочих мест» // Консультант Плюс. URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_165527/031293279e07480ff7bdae14a62e071a30babd3b/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_165527/031293279e07480ff7bdae14a62e071a30babd3b/) (дата обращения: 11.09.2017).

3. *Парахуда Р.Н., Шевцов В.И.* Автоматизация измерений и контроля. Письменные лекции. СПб.: Изд-во СЗТУ. 75 с.

3. *Бабуров В.И., Колесников А.К., Столяров Г.В.* Проблемы ближней навигации // Воздушно-космическая оборона. 2008. № 3. С. 29–36.
4. *Бабуров С.В., Буряков Д.А., Велькович М.А., Елисеев Б.П., Иванов А.В., Козлов А.И.* Перспективы развития радиотехнических систем гражданского назначения // Научный вестник МГТУ ГА. 2012. № 176. С. 7–17.
5. Материалы межгосударственной радионавигационной Программы государств — участников Содружества Независимых Государств на период до 2016 года «О ходе реализации Основных направлений (плана) развития радионавигации государств — участников СНГ на 2013–2017 годы» // Народное образование. URL: <http://narodiosii.ru/?p=14302> (дата обращения: 11.09.2017).
6. ОАО «ВНИИРА» впервые представит новое поколение наземных средств ближней навигации на МАКС-2013. URL: <https://www.aex.ru/news/2013/8/23/109635/> (дата обращения: 08.08.2017).
7. *Пахолков Г.А., Шатраков Ю.Г.* Угломерные радиотехнические системы посадки. М.: Транспорт, 1992. 159 с.
8. *Панич А.А., Скородумов С.В., Шумова Т.К.* Перспективные технологии приборостроения. М.: Экономика, 2011. 406 с.
9. *Валетов В.А., Бобцова С.В.* Новые технологии в приборостроении. СПб.: Изд-во СПбГУ ИТМО, 2004. 120 с.
10. *Троелсен Э.* Язык программирования С# 5.0 и платформа NET 4.5. М.: Вильямс, 2013. 1311 с.
11. *Бабич О.А.* Обработка информации в навигационных комплексах. М.: Машиностроение, 1991. 512 с.
12. *Анодина Т.Г., Игнатъев Ю.В., Кашинов В.В.* Современные системы ближней радионавигации. М.: Транспорт, 1996. 200 с.
13. *Шатилов А.Ю.* Разработка методов и алгоритмов оптимальной обработки сигналов и информации в инерциально-спутниковых системах навигации: дис. ... канд. тех. наук. М., 2007. 288 с.
14. *Шатраков Ю.Г., Ривкин М.И.* Самолетные антенные системы. М.: Машиностроение, 1989. 184 с.
16. Распоряжение Правительства РФ от 9 июля 2014 г. N1250-р «О плане мероприятий по обеспечению повышения производительности труда, созданию и модернизации высокопроизводительных рабочих мест» // Консультант Плюс. URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_165527/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_165527/) (дата обращения: 11.09.2017).

---

## REALIZATION OF THE CONCEPT TO MAINTAIN THE EXISTING RADIO SYSTEMS OF NEAR NAVIGATION AND LANDING IN AN EFFICIENT STATE

**VALENTIN S. KOTOV,**

St. Petersburg, Russia, legkieshagi@ya.ru

**RIMMA K. REZNIKOVA,**

St. Petersburg, Russia, legkieshagi@yandex.ru

**ALEXANDER A. MORIN,**

St. Petersburg, Russia, morin.alexandr@mail.ru

**KEYWORDS:** automation; radio receivers; measuring systems; "Tropa-SMD"; estimation of parameters; receiver; ARFB "Tropa".

### ABSTRACT

The work is devoted to the improvement and modernization of the national near-navigation system using the example of a radio receiver, which is part of the "Tropa-SMD" system. The azimuth-rangefinder beacons "Tropa-SMD" are intended for the modernization of aerodromes of military departments, airfields of joint basing, as well as for installation of small and medium displacement vessels. They are designed to work with on-board equipment of near-navigation radio systems of the third and subsequent generations, as well as in the international frequency band and are necessary for the transfer of existing navigation aids to the international frequency band in ac-

cordance with the obligations assumed by Russia to comply with the requirements of the International Radio Regulations.

The paper describes the software and hardware for checking the product for compliance with the technical specifications of modern navigation systems, analyzed the results of the study of the parameters of the "Tropa-SMD" system for compliance with the requirements for technical devices, namely: sensitivity measurement of the radio receiver; measurement of attenuation X of sensitivity; the measurement of the susceptibility level for blocking; the measurement of the level of sensitivity and the dynamic range of crosstalk;



measurement of the dynamic range by intermodulation; Measurement of the sensitivity level by the secondary reception channels.

The study was carried out with the help of a test bench, on which the parameters of the receiving device of the azimuth-range-measuring beacon "Tropa" were estimated. To manage the stand, the program Trail Measurement was developed. The program is written in C #.

The program is object-oriented. During the development, instrument management classes, classes for measuring, and a class for calibrating the detection thresholds were created.

The results of the study of the receiver parameters are represented by graphs and in the form of tables.

## REFERENCES

1. Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 22.02.2000 N144 "Ob utverzhdenii Kontseptsii modernizatsii i razvitiya Edinoi sistemy organizatsii vozdušnogo dvizheniya Rossiyskoy Federatsii" [Order of the Government of the Russian Federation of 22.02.2000 N144 "about the approval Of the concept of modernization and development of the Uniform system of the air traffic organization of the Russian Federation"]. *ConsultantPlus*. URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_26256/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_26256/). (In Russian)
2. Rasporyazheniye Pravitel'stva RF ot 9 iyulya 2014 g. N1250-r «O plane mero-priyatiy po obespecheniyu povysheniya proizvoditel'nosti truda, sozdaniya i modernizatsii vysokoproizvoditel'nykh rabochikh mest» [Decree of the Government of the Russian Federation of July 9, 2014 No. 1250-r "On the plan of measures to ensure the increase of labor productivity, the creation and modernization of high-performance jobs"]. (In Russian)
3. Parakhuda R. N., Shevtsov V. I. *Avtomatizatsiya izmereniy i kontrolya. Pis'mennyye lektsii* [Automation of measurement and control. Written lectures]. St. Petersburg: SZTU Publ., 75 p. (In Russian)
4. Baburov V. I., Kolesnikov A. K., Stolyarov G. V., Problemy blizhney navigatsii [Problems of near navigation]. *Vozdushno-kosmicheskaya oborona* [Aerospace Defense]. 2008. No. 3. Pp. 29-36. (In Russian)
5. Baburov S. V., Buryakov D. A., Vel'kovich M. A., Yeliseyev B. P., Ivanov A. V., Kozlov A. I. Prospects for development of civil engineering radio systems. *Nauchnyy vestnik MGTU GA* [Civil Aviation High TECHNOLOGIES]. 2012. No. 176. Pp. 7-17. (In Russian)
6. Materialy mezhdgosudarstvennoy radionavigatsionnoy Programmy gosudarstv – uchastnikov Sodruzhestva Nezavisimykh Gosudarstv na period do 2016 goda «O khode realizatsii Osnovnykh napravleniy (plana) razvitiya radionavigatsii gosudarstv – uchastnikov SNG na 2013–2017 gody» [Materials of the interstate radio navigation program of the member states of the Commonwealth of Independent States for the period until 2016 "On the progress in the implementation of the Basic Directions (Plan) for the Development of the Radio Navigation of the CIS Member States for 2013–2017"]. *Narodnoe obrazovanie* [Public education]. URL: <http://narodirossii.ru/?p=14302> (date of access: 11.09.2017). (In Russian)
7. Public corporation "VNIIRA" v pervyye predstavit novoye pokoleniye nazemnykh sredstv blizhney navigatsii na MAKS-2013 [JSC VNIIRA will present for the first time a new generation of ground-based near-navigation facilities at MAKS-2013]. URL: <https://www.aex.ru/news/2013/8/23/109635/>. (date of access: 08.08.2017). (In Russian)
8. Pakholkov G. A., Shatrakov Yu. G. *Uglomernyye radiotekhnicheskiye sistemy posadki* [Goniometer radio engineering landing systems]. Moscow: Transport Publ., 1992. 159 p. (In Russian)
9. Panich A. A., Skorodumov S. V., Shumova T. K. *Perspektivnyye tekhnologii priborostroyeniya* [Goniometer radio engineering landing systems]. Moscow: Ekonomika Publ., 2011. 406 p. (In Russian)
10. Valetov V. A., Bobtsova S. V. *Novyye tekhnologii v priborostroyenii* [Perspective technologies of instrument making]. St. Petersburg: ITMO University Publ., 2004. 120 p. (In Russian)
11. Troelsen A. Pro C# 5.0 and the .NET 4.5 Framework. 6th edition. Apress, 2012. 1533 p.
12. Babich O. A. *Obrabotka informatsii v navigatsionnykh kompleksakh* [Information processing in navigation complexes]. Moscow: Mashinostroyeniye Publ., 1991. 512 p. (In Russian)
13. Anodina T. G., Ignat'yev Yu. V., Kashinov V. V. *Sovremennyye sistemy blizhney radionavigatsii* [Modern systems of short-range radio navigation]. Moscow: Transport Publ., 1996. 200 p. (In Russian)
14. Shatilov A. Yu. *Razrabotka metodov i algoritmov optimal'noy obrabotki signalov i informatsii v inertial'no-sputnikovyykh sistemakh navigatsii* [Development of methods and algorithms for optimal signal and information processing in inertial-satellite navigation systems]: dis. ... kand. tekhn. nauk. Moscow, 2007. 288 p. (In Russian)
15. Shatrakov Yu. G., Rivkin M. I. *Samoletnyye antennyye sistemy* [Aircraft antenna systems]. Moscow: Mashinostroyeniye Publ., 1989. 184 p. (In Russian)
16. Rasporyazheniye Pravitel'stva RF ot 9 iyulya 2014 g. N1250-r «O plane mero-priyatiy po obespecheniyu povysheniya proizvoditel'nosti truda, sozdaniya i modernizatsii vysokoproizvoditel'nykh rabochikh mest» [Decree of the Government of the Russian Federation of July 9, 2014 No. 1250-r "On the plan of measures to ensure the increase of labor productivity, the creation and modernization of high-performance jobs"]. *ConsultantPlus*. URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_165527/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_165527/) (date of access: 11.09.2017). (In Russian)

## INFORMATION ABOUT AUTHORS:

Kotov V. S., PhD, Lecturer of the Military Institute (Naval Polytechnic) Military educational and scientific center of the Navy "Naval Academy. Admiral of the Fleet of the Soviet Union N.G. Kuznetsov";

Reznikova R. K., PhD, Senior lecturer of the Military educational and scientific center of the Navy "Naval Academy named after. Admiral of the Fleet of the Soviet Union N.G. Kuznetsov";

Morin A. A., Student of the Baltic State Technical University "Voenmeh" D.F. Ustinov.

doi: 10.24411/2409-5419-2018-10076

# ДВУСТОРОННИЕ МЕТОДЫ ИНТЕГРИРОВАНИЯ ЖЕСТКИХ СИСТЕМ ОБЫКНОВЕННЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ НА ОСНОВЕ ИНТЕГРАЛА ДЮАМЕЛЯ

**АРУТЮНЯН**

**Тигран Робертович<sup>1</sup>**

**НЕКРАСОВ**

**Сергей Александрович<sup>2</sup>**

## АННОТАЦИЯ

В работе рассмотрены факторы, обуславливающие погрешность двусторонних и интервальных методов решения обыкновенных дифференциальных уравнений. Приводятся примеры, иллюстрирующие экспоненциальный характер роста погрешности рассматриваемых методов. Проводится сравнение с традиционными вещественными методами. Интервальный метод для решения жестких систем обыкновенных дифференциальных уравнений, устойчивый на всей числовой оси. Предложены двусторонние методы с апостериорной оценкой погрешности, имеющие существенно улучшенные вычислительные качества для случая больших промежутков интегрирования. Описывается интервальный метод численного интегрирования начальных задач, эффективный для практически важного класса жестких систем обыкновенных дифференциальных уравнений и обладающий сходимостью и устойчивостью на бесконечном интервале. Без ограничения общности рассматривается задача Коши для автономной нелинейной системы обыкновенных дифференциальных уравнений. Значения начальных условий заданы с погрешностью. Предполагается, что решение начальной задачи существует, единственно и принадлежит классу  $C^1$ . Для построения вычислительного метода используется интеграл Дюамеля. Использование этой формулы приводит к вычислительным методам двух типов: многошаговый интервальный метод на основе решения интегрального уравнения Вольтерра, Доказана сходимость и асимптотическая устойчивость численного метода относительно возмущений в начальных условиях. Другой интервальный метод, получающийся на основании уравнения Дюамеля является одношаговым конечно-разностным методом, в котором интервальная оценка решения на каждом шаге вычисляется рекуррентным образом по значениям соответствующей оценки на предыдущем шаге. При равной точности методы обладают рядом преимуществ и недостатков. Первый метод алгоритмически прост, однако затраты времени при его использовании растут пропорционально квадрату числа шагов интегрирования. Второй метод характеризуется на порядок меньшими суммарными вычислительными затратами, линейно зависящими от числа шагов интегрирования как у обычных (т.е. вещественных) методов интегрирования обыкновенных дифференциальных уравнений. Однако в общем случае для обеспечения сходимости и устойчивости второго метода на бесконечном интервале интегрирования требуется специальная замена переменных, что несколько усложняет алгоритм вычислений. Второй метод является интервальным обобщением и развитием т.н. полуаналитического метода, применявшегося для расчета электрических цепей в случае, когда постоянные времени различных частей цепи существенно различаются. Несмотря на дополнительные сложности, связанные с расчетом экспоненциальной матрицы, данный метод обеспечивает при практических расчетах многократный выигрыш по времени.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** двусторонний метод; интервальный метод; погрешность; устойчивость; сходимость.

## Сведения об авторах:

<sup>1</sup>магистр Московского технического университета связи и информатики, г. Москва, Россия, rob57@mail.ru

<sup>2</sup>д.т.н., профессор кафедры прикладной математики Южно-Российского государственного политехнического университета, г. Новочеркасск, Россия, nekrasoff\_novoch@mail.ru

**Для цитирования:** Арутюнян Т.Р., Некрасов С.А. Двусторонние методы интегрирования жестких систем обыкновенных дифференциальных уравнений на основе интеграла Дюамеля // Научно-технические технологии в космических исследованиях Земли. 2018. Т. 10. № 3. С. 64-73. doi: 10.24411/2409-5419-2018-10076

## Введение

Проблема нахождения численного решения различных задач с гарантированной точностью постоянно находится в центре внимания исследователей. Одним из наиболее эффективных подходов является применение интервальных и двусторонних методов. Результаты, достигнутые в области теории данных методов, достаточно полно отражены в [1–8]. Приложения указанных методов в разнообразных областях науки и техники постоянно расширяются. Принципиально важным достоинством интервальных и двусторонних методов является возможность проверки существования и единственности решения задачи только на основе вычислительного эксперимента [1–2].

Рассматриваемой проблеме посвящено множество публикаций, из которых можно отметить [1–8].

## 1. Факторы, обуславливающие погрешность двусторонних и интервальных методов решения обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ)

Основной недостаток известных интервальных и двусторонних методов для решения задачи Коши [1–2] связан с тем, что их погрешность (ширина полосы решения) растет экспоненциально в зависимости от длины интервала интегрирования  $(0, t_F)$ . Для любой заданной точности  $\varepsilon$  предельно допустимая длина интервала интегрирования весьма слабо (логарифмически) зависит от значения шага интегрирования  $h$ :  $t_F^{\max}(\varepsilon, h) = O(\ln h^{-1})$ ,  $h \rightarrow 0$ . Т.е., чтобы увеличить длину промежутка интегрирования в 2 раза, условно говоря, требуется уменьшить шаг интегрирования в  $e^2 \approx 7,4$  раз независимо от порядка точности метода. Рассмотрим следующий характерный пример.

**Пример 1.** Требуется решить задачу Коши для системы ОДУ

$$\begin{aligned} dx_1/dt &= x_2, dx_2/dt = -x_1, t \in (0, t_F); \\ x_1(0) &= 1, x_2(0) = 0. \end{aligned}$$

Ее точное решение  $x_1 = \cos(t)$ ,  $x_2 = \sin(t)$  принадлежит промежутку  $[-1, 1]$ .

1. *Конечно-разностная схема метода Мура первого порядка* имеет вид [1, 2]:

$$\begin{aligned} X_{1,j+1} &= X_{1,j} + hX_{2,j} + [-1,1]h^2/2, X_{2,j+1} = \\ &= X_{2,j} - hX_{1,j} + [-1,1]h^2/2, j = 0, 1, \dots \end{aligned}$$

$X_{1,j}, X_{2,j}$  — интервалы, содержащие решение:  $x_k(t_j) \in X_{k,j}$ ,  $k=1,2$ ;  $j=1,2,\dots$ ;  $h$  — шаг интегрирования. Ширина интервального решения удовлетворяет уравнениям:

$$\begin{aligned} w_{1,j+1} &= w_{1,j} + hw_{2,j} + h^2, w_{2,j+1} = \\ &= w_{2,j} + hw_{1,j} + h^2, j = 0, 1, \dots \end{aligned}$$

Суммарная ширина  $w_j = w_{1,j} + w_{2,j}$  может быть вычислена из уравнений:

$$w_{j+1} = w_j + hw_j + 2h^2, j = 0, 1, \dots$$

Решение данного рекуррентного уравнения равно:

$$w_j = 2h[(1+h)^j - 1] \approx 2h[\exp(t_j) - 1], j = 0, 1, \dots$$

За границу допустимого интервала  $[-1, 1]$  интервальное решение также выйдет при  $t_{\max} \approx -\ln h$ ,  $h \rightarrow 0$ . Принципиально, что для методов более высокого порядка точности  $k$  оценка остается той же:

$$t_{\max} \approx -\ln h^{-k} = -k \ln h = O(\ln h^{-1}), h \rightarrow 0.$$

2. *Двусторонний метод* [2]. Решение отыскивается в виде интервалов

$$X_i = s_i + [-1, 1]s_i^{(2)} + [-a, a]s_i^{(1)}, i = 1, 2;$$

где  $a$  — некоторая неизвестная константа,  $s_i, s_i^{(1)}, s_i^{(2)}$  — эрмитовы сплайны третьей степени. Сплайны  $s_i$ ,  $i = 1, 2$ , аппроксимируют решение  $x_i$ ,  $i = 1, 2$ , задачи Коши. Они строятся по данным приближенного решения задачи каким-либо численным методом, например Рунге-Кутта. Сплайны  $s_i^{(1)}, s_i^{(2)}, i = 1, 2$ , аппроксимируют решения  $u, v, i = 1, 2$ , двух вспомогательных задач Коши:

$$\begin{aligned} du/dt &= Wu + w, t \in (0, t_F), u(0) = 0, \\ dv/dt &= Wv, t \in (0, t_F), v(0) = 0, \end{aligned}$$

где вектор  $w$  имеет единичные компоненты, а матрица  $W$  состоит из элементов

$$W_{ii} = \partial f_i / \partial x_i, i = 1, 2; W_{ij} = \left| \partial f_i / \partial x_j \right|, i \neq j, i, j = 1, 2,$$

где  $f_i, i = 1, 2$  — функции правых частей задачи Коши.

Для обеспечения двусторонности оценок  $X_i, i = 1, 2$ , значение параметра  $a$  выбирается по формуле:

$$a = \max(\Phi_i(t) / \Psi_i(t); t \in (0, t_F), i = 1, 2).$$

Функции  $\Phi_i(t)$  и  $\Psi_i(t)$  определяются при помощи следующих соотношений:

$$\Phi_i(t) = \left| \varphi_i(s, t) \right| - ds_i^{(2)} / dt + g_{i,1}s_1^{(2)}(t) + g_{i,2}s_2^{(2)}(t),$$

$$\Psi_i(t) = ds_i^{(1)} / dt - g_{i,1}s_1^{(1)}(t) - g_{i,2}s_2^{(1)}(t),$$

$$\begin{aligned} \varphi_i(s, t) &= f_i(s) - ds_i / dt, g_{i,i} = \partial f_i / \partial x_i, g_{i,j} = \\ &= \left| \partial f_i / \partial x_j \right|, i \neq j, i, j = 1, 2, \end{aligned}$$

С учетом исходных данных задачи  $f_1(x) = x_2, f_2(x) = -x_1$ . Следовательно,

$$\begin{aligned} W_{11} = W_{22} &= 0, W_{12} = W_{21} = 1; \\ v_i(t) &= 0, s_i^{(2)}(t) = 0, \Phi_i(t) = |\varphi_i(s, t)|, \end{aligned}$$

$$\Psi_1(t) = ds_1^{(1)} / dt - s_2^{(1)}(t), \Psi_2(t) = ds_2^{(1)} / dt - s_1^{(1)}(t),$$

$$X_i = s_i + [-a, a] s_i^{(1)}, \forall t \in (0, t_F), i = 1, 2.$$

Предположим сплайны  $s_i, i = 1, 2$ , аппроксимируют решение исходной задачи  $x_i, i = 1, 2$ , с порядком точности  $k$ . Решение вспомогательной задачи Коши  $u(t)$  находится точно:  $u_i(t) = e^t - 1, i = 1, 2$ . Тогда  $\Psi_1(t) = \Psi_2(t) = 1$ .

Ширина двустороннего решения равна:

$$w_j = a(e^{t_j} - 1), j = 0, 1, \dots; a = O(h^k), h \rightarrow 0.$$

Следовательно, для рассмотренного двустороннего метода *сколь угодно высокого порядка точности*  $k$  оценка остается такой же неудовлетворительной:

$$t_{\max} \approx \ln h^{-k} = -k \ln h = O(\ln h^{-1}), h \rightarrow 0.$$

### Применимость метода для случая жестких систем ОДУ

В работе [8] показано, что двусторонний метод [2], в принципе, позволяет решать некоторые жесткие задачи Коши для ОДУ. Однако, соответствующий класс задач относительно узок. Например, в статье [8] приводится пример жесткой системы с матрицей:

$$A = \begin{bmatrix} -20000 & 0 & 0 \\ 20000 & -1 & 1 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix}.$$

Однако достаточно изменения значения одного элемента матрицы  $a_{23}$  с 1 на  $-2$ , как двусторонний метод перестает быть устойчивым, хотя система ОДУ остается асимптотически устойчивой. Отмеченные свойства определяются собственными значениями матриц  $A$  и  $W$ , которые соответственно равны:

$$\lambda_1 = -20000, \lambda_{2,3} = -1 \pm i\sqrt{2}, \operatorname{Re} \lambda_{1,2,3} < 0;$$

$$\hat{\lambda}_1 = -20000, \hat{\lambda}_2 = \sqrt{2} - 1, \hat{\lambda}_3 = -\sqrt{2} - 1, \operatorname{Re} \hat{\lambda}_2 > 0.$$

### 3. Традиционные численные методы интегрирования ОДУ

Для традиционных (т.н. вещественных) методов численного интегрирования известная теоретическая оценка глобальной погрешности в классе непрерывно-дифференцируемых функций также является экспоненциально возрастающей с увеличением интервала интегрирования [9]. Однако эта оценка получена для весьма широкого класса функций, а потому является весьма завышенной и на практике далеко не всегда соответствует действительности. Отмеченное обстоятельство особенно проявляет себя для широко употребительных динамических моделей физики и техники, для которых точное решение ограничено или стремится к нулю на бесконечности.

Погрешность традиционных численных методов для отмеченных моделей относительно слабо возрастает по мере увеличения интервала интегрирования. Для иллюстрации рассмотрим решение задачи Коши простейшим традиционным методом наименьшего порядка точности — явным методом Эйлера. Его разностная схема имеет вид:

$$x_{1,j+1} = x_{1,j} + hx_{2,j}, x_{2,j+1} = x_{2,j} - hx_{1,j}, j = 0, 1, \dots$$

Формула для сеточного решения имеет вид:

$$z_j = x_{1,j} + ix_{2,j}, i^2 = -1, j = 0, 1, \dots;$$

$$z_j = (1 - ih)^j z_0, j = 0, 1, \dots;$$

откуда находится оценка погрешности численного решения:

$$\left| e^{it_j} - (1 - ih)^j \right| \leq t_F h e^{t_F h} \leq \varepsilon, j = 0, 1, \dots; \text{ и допустимая длина интервала интегрирования: } t_{\max} \approx \frac{\varepsilon}{h} = O(h^{-1}), h \rightarrow 0.$$

Таким образом, даже для простейшего вещественного численного метода оценка погрешности и допустимой длины интервала интегрирования *принципиально лучше* по сравнению с известными интервальными и двусторонними методами. В неинтервальной постановке погрешность метода обычно оценивается при помощи правила Рунге. Однако данное правило дает асимптотическую оценку, а не гарантированную, как двусторонние в строгом смысле численные методы.

Чрезмерное уменьшение шага интегрирования приводит к весьма неравномерному распределению локальной погрешности метода и значительному влиянию погрешностей округлений, приводящему к потере гарантий двусторонности решения. Таким образом, для известных интервальных и двусторонних методов имеют место экспоненциальный рост погрешности и весьма жесткое ограничение на длину интервала интегрирования.

В теории интервальных методов решения ОДУ существует также проблема, носящая название «*эффект*



раскрутки» («эффект упаковывания», эффект Мура), широко обсуждаемая в литературе [1,2] и имеющая некоторое значение для описываемых ниже методов. Эффект Мура определяется как явление расширения интервального решения динамической системы вне зависимости от применяемого метода (в рамках интервального подхода). Этот эффект обычно иллюстрируется на примере задачи:

$$\begin{aligned} dx_1 / dt &= x_2, \quad dx_2 / dt = -x_1, \quad t > 0, \\ x_1(0) &\in 1 + [-\varepsilon, \varepsilon], \quad x_2(0) \in [-\varepsilon, \varepsilon], \quad \varepsilon > 0. \end{aligned}$$

Множество решений данной системы на плоскости  $(x_1, x_2)$  вращается вокруг начала координат, не меняя формы. При интегрировании обычным интервальным методом в каждый момент времени находится квадрат с параллельными осям координат сторонами, который содержит это множество и шире исходного множества, а размеры его растут независимо от того, какие пошаговые интервальные методы применяются [1]. Для уменьшения влияния этого эффекта на возрастание ширины решения предложены различные приемы: 1) преобразование системы координат; 2) замена переменных; 3) использование интервалов сложной формы. Данная проблема решена в литературе для случая линейных ОДУ с интервальными коэффициентами [1,2].

В предлагаемых ниже методах прямоугольные интервалы заменены на круглые, что позволило устранить неограниченный рост погрешности двустороннего решения и в случае нелинейной задачи.

## 2. Интервальный метод для решения жестких систем ОДУ, устойчивый на всей числовой оси

### 2.1. Постановка задачи

Весьма широкий и практически важный класс задач связан с расчетом динамических процессов установления в системах с диссипацией (затуханием). Соответствующие системы ОДУ характеризуются свойством асимптотической устойчивости их нулевого решения, а их фазовый поток остается ограниченным или расширяется не слишком быстро. В ряде случаев постоянные времени для компонент вектора решения различаются по порядку величины. Подобные системы ОДУ относят к жестким, а их численное интегрирование представляет собой особо сложную задачу.

В [11–15] автором предложены двусторонние методы с апостериорной оценкой погрешности, имеющие существенно улучшенные вычислительные качества для случая больших промежутков интегрирования. Однако при решении жестких систем ОДУ эти методы не всегда достаточно эффективны. В данной статье описывается интервальный метод численного интегрирования начальных задач, эффективный для практически важного класса жестких систем ОДУ и обладающий сходимостью и устойчивостью на бесконечном интервале.

Без ограничения общности будем рассматривать задачу Коши для автономной системы ОДУ

$$dx / dt = f(x), t > 0; x(0) = x_0 \quad (1)$$

где  $x$  и  $f$  – вектор-функции  $x = (x_1, \dots, x_m)^T$ ,  $f = (f_1, \dots, f_m)^T$ ,  $x_0 = (x_{01}, \dots, x_{0m})^T$ , значения начальных условий  $x_0$  заданы с погрешностью  $\delta$ ,  $f(x) = Ax + r(x)$ ,  $A = [a_{ij}]_{i,j=1,\dots,m}$  – матрица с действительными коэффициентами, все собственные значения  $\{\lambda_k\}_{k=1,\dots,m}$ , которой имеют отрицательные действительные части, строго меньшие величины —  $\lambda_0 < 0$ ;  $r(x)$  – нелинейная часть вектор-функции  $f(x)$ , обладающая свойством  $\max\{\|r(x)\|, \|r_x(x)\|_1 \|x\|\} \leq C_0 \|x\|^2, \forall x: \|x\| \leq \gamma$ , где  $\|x\| = \max\{|x_1|, \dots, |x_m|\}$ ,  $r_x(x)$  – матрица Якоби  $[\partial r_i / \partial x_j]_{i,j=1,\dots,m}$ ,  $\|\cdot\|_1$  – согласованная с  $\|\cdot\|$  матричная норма:  $\|A\|_1 = \max\{|a_{11}| + \dots + |a_{1m}|; \dots, |a_{m1}| + \dots + |a_{mm}|\}$ ;  $i = 1, \dots, m$ ;  $C_0, \gamma$  – некоторые положительные константы.

Будем предполагать, что решение задачи (1) существует, единственно и принадлежит классу  $C^1(0, \infty)$ , причем  $x(t) \rightarrow 0$  при  $t \rightarrow \infty$ . Следовательно, существует конечный  $m$  – мерный интервал  $\Delta$ , такой что  $x(t) \in \Delta \forall t \geq 0$ .

Введем в рассмотрение разбиение полуоси  $(0, \infty)$  с шагом  $h$ :  $0 = t_0 < t_1 < \dots < t_k < \dots$

При помощи интеграла Дюамеля задача Коши (1) редуцируется к эквивалентному интегральному уравнению Вольтерра:

$$\begin{aligned} x(t) &= \exp[A(t - t_{j-1})]x(t_{j-1}) + \\ &+ \int_{t_{j-1}}^t \exp[A(t - \tau)]r(x(\tau))d\tau, \quad (2) \\ t &\geq t_{j-1}, j = 1, 2, \dots \end{aligned}$$

Использование этой формулы может приводить к вычислительным методам двух типов, рассматриваемых в последующих частях статьи.

### 2.2. Многошаговый интервальный метод на основе решения интегрального уравнения Вольтерра

Это уравнение получается из (2) при  $j = 1$ :

$$x(t) = \exp(At)x_0 + \int_0^t \exp[A(t - \tau)]r(x(\tau))d\tau, \quad (3)$$

Интервальные оценки решения  $X_j$  в узлах интегрирования  $t = t_j$  находятся в соответствии с правилами интегрирования интервальнозначных функций [1] по формулам:

$$X_j = \exp(At_j)X_0 + \sum_{k=1}^j \exp[A(t_j - T_k)]R(X_k^*)h_k, \quad (4)$$

где  $j = 1, 2, \dots$ ;  $X_0$  — интервальная оценка начального условия  $x_0$ ,  $X_k^*$  — интервальная оценка решения  $x(t)$  на отрезке  $T_k = [t_{k-1}, t_k]$ ,  $h_k = t_k - t_{k-1}$ ,  $R(X)$  — интервальное расширение функции  $r(x)$ , для которого будем предполагать выполненным условие:  $\|w(R(X))\| \leq C \|X\| \cdot \|w(X)\|$ , где  $C$  — некоторое положительное число. Это предположение согласуется со свойствами функции  $r(x)$ .

Если известна интервальная оценка  $X_{j-1}$  решения задачи  $x(t)$  при  $t = t_{j-1}$ , то, согласно (2), интервальная оценка  $x(t)$  на отрезке  $T_j$  (т.е. значение  $X_j^*$ ) при достаточно малом шаге интегрирования может быть вычислена посредством решения интервального уравнения:

$$X_j^* = [e^{AH_j} X_{j-1} + H_j e^{AH_j} R(X_j^*)] \cap \Delta, H_j = [0, h_j], \quad (5)$$

$j = 1, 2, \dots$

**Утверждение 1.** *Оценки, получаемые при помощи метода (4), (5) обладают свойством двусторонности.*

Доказательство относительно элементарно и осуществляется на основе стандартных технических приемов [1,2].

**Утверждение 2.** *Интервальный метод (4), (5) при  $h \rightarrow 0$  сходится и асимптотически устойчив.*

**ДОКАЗАТЕЛЬСТВО.** Оценим сверху значения ширины интервального решения  $w(X_j), w(X_j^*), j = 1, 2, \dots$ . Из соотношений (4), (5) с учетом формул для ширины произведения интервалов [1]:  $w(AB) \leq |A|w(B) + |B|w(A)$ ,  $w(AH_j) \leq 2|A|h_j$ , находим

$$\|w(X_j)\| \leq \|e^{At_j}\| \|w(X_0)\| + \sum_{k=1}^j \left[ \|w(e^{A(t_j-T_k)})\| \|R(X_k^*)\| + \|e^{A(t_j-T_k)}\| \|w(R(X_k^*))\| \right] h_k, \quad (6)$$

$$\|w(X_j^*)\| \leq \|e^{AH_j}\| \cdot \|w(X_{j-1})\| + \|w(e^{AH_j})\| \cdot \|X_{j-1}\| + 2h_j \|e^{AH_j}\| \cdot \|R(X_j^*)\|, \quad (7)$$

$$j = 1, 2, \dots$$

Так как действительные части всех собственных значений матрицы  $A$  отрицательны и решение задачи Коши (1) ограничено и стремится к нулю при  $t \rightarrow \infty$ , то обоснованы оценки:

$$\|e^{At}\| \leq C_1 e^{-\lambda t}, \quad \|x(t)\| \leq C_1 e^{-\lambda t}, \quad (8)$$

где  $\lambda, C_1$  — некоторые положительные константы. Используемые ниже коэффициенты  $C_2, C_3, \dots$  также обозначают некоторые положительные числа.

Идея доказательства основана на стандартном техническом приеме: вначале предположим, что для интервального решения (4), (5) выполнены оценки, аналогичные (8):

$$\|X_j\| \leq C_2 e^{-\lambda t_j}, \quad (9)$$

далее на основании соотношений (6)-(9) получим оценки для ширины интервального решения и покажем, что они согласуются со сделанными предположениями.

$$\text{Так как } \|w(X_0)\| \leq \delta, \quad \|R(X_k^*)\| \leq \widehat{C}_1 \|X_k^*\|^2,$$

$$\|w(R(X_k^*))\| \leq \widehat{C} \|X_k^*\| \cdot \|w(X_k^*)\|, \quad \|e^{AH_k}\| \leq C_2,$$

С учетом (5):

$$\begin{aligned} \|X_k^*\| &\leq \|e^{AH_k}\| (\|X_{k-1}\| + h_k R(X_k^*)) \leq \\ &\leq \|e^{AH_k}\| (\|X_{k-1}\| + h_k \widehat{C}_1 \|X_k^*\|^2) \leq \\ &\leq C_2 (\|X_{k-1}\| + h_k \widehat{C}_1 \|X_k^*\|^2) \leq C_2 \|X_{k-1}\| + C_3 h_k \|X_k^*\|^2, \end{aligned}$$

следовательно, при достаточно малых  $h_k$ :

$$\|X_k^*\| \leq C_4 \|X_{k-1}\| \leq C_5 e^{-\lambda t_k}, \quad \|w(e^{A(t_j-T_k)})\| \leq C_6 h_k,$$

$$\text{С учетом (7)} \quad \|w(X_k^*)\| \leq C_7 (\|w(X_{k-1})\| + h_k),$$

$$\begin{aligned} \|w(X_j)\| &\leq C_1 e^{-\lambda t_j} \delta + C_8 \sum_{k=1}^j [h_k^2 e^{-2\lambda t_j} + h_k \|w(X_k^*)\| e^{-\lambda t_j}] \leq \\ &\leq C_1 e^{-\lambda t_j} \delta + C_9 \sum_{k=1}^j [h_k^2 e^{-2\lambda t_j} + h_k \|w(X_{k-1})\| e^{-\lambda t_j} + h_k^2 e^{-\lambda t_j}], \end{aligned}$$

После подстановки (8)-(9) в (6) и некоторых преобразований находим:

$$\|w(X_j)\| \leq C_{10} \exp(-\lambda t_j) \left( \delta + h + h \sum_{k=1}^{j-1} \|w(X_k)\| \right), \quad (10)$$

$$j = 1, 2, \dots$$

где  $h$  — наибольший шаг интегрирования.

Из соотношений (10) после ряда технических преобразований может быть получена оценка, которая согласуется со сделанными предположениями (9) при  $\delta, h \rightarrow 0$ :

$$\|w(X_j)\| \leq C_4 \exp(-\lambda t_j) (\delta + h), \quad j = 1, 2, \dots \quad (11)$$

Таким образом, интервальное решение сходится к точному и также является асимптотически устойчивым относительно возмущений в начальных условиях.

Другой интервальный метод, получающийся на основании уравнений (2) является одношаговым конечно-разностным методом, в котором интервальная оценка решения на  $j$ -м шаге вычисляется рекуррентным образом по

значениям соответствующей оценки на  $(j-1)$ -м шаге. При равной точности методы обладают рядом преимуществ и недостатков. Первый метод алгоритмически прост, однако затраты времени при его использовании растут пропорционально квадрату числа шагов интегрирования. Второй метод характеризуется на порядок меньшими суммарными вычислительными затратами, *линейно* зависящими от числа шагов интегрирования как у обычных (т.е. вещественных) методов интегрирования ОДУ. Однако в общем случае для обеспечения сходимости и устойчивости второго метода на бесконечном интервале интегрирования требуется специальная замена переменных, что несколько усложняет алгоритм вычислений.

Этот метод является интервальным обобщением и развитием т.н. полуаналитического метода, применявшегося для расчета электрических цепей в случае, когда постоянные времени различных частей цепи существенно различаются. Несмотря на дополнительные сложности, связанные с расчетом экспоненциальной матрицы, данный метод обеспечивает при практических расчетах многократный выигрыш по времени.

### 2.3. Одношаговые интервальные методы

Его простейший вариант имеет вид:

$$X_j = e^{Ah_j} X_{j-1} + h_j e^{Ah_j} R(X_j^*), j = 1, 2, \dots \quad (12)$$

Интервальные оценки  $X_j^*$  решения  $x(t)$  на отрезках  $[t_{j-1}, t_j], j = 1, 2, \dots$ , в данном методе вычисляются также при помощи соотношений (5). Из (12) находится следующая оценка ширины интервального решения:

$$\|w(X_j)\| \leq \|e^{Ah_j}\| \cdot \|w(X_{j-1})\| + h_j \|w(e^{Ah_j} R(X_j^*))\|, j = 1, 2, \dots$$

Поскольку  $\|e^{Ah_j}\|$  может быть больше 1, то данный вариант метода, вообще говоря, не является асимптотически устойчивым, что подтвердили вычислительные эксперименты для традиционных модельных задач.

Отмеченный недостаток метода удастся эффективно устранить при помощи специальной замены переменных.

В дальнейшем, без ограничения общности шаг интегрирования считается постоянным.

Пусть  $D = D(h)$  — преобразующая матрица, соответствующая жордановой форме  $\Lambda$  матрицы  $B = e^{Ah}$ :  $\Lambda = D^{-1}BD$ . Согласно известной теории матриц существует преобразующая матрица  $D$  такая, что жорданова форма  $\Lambda$  имеет вид:

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \exp(\lambda_1 h) & a_{12} & 0 & \dots \\ 0 & \exp(\lambda_2 h) & a_{23} & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix},$$

где  $a_{i,i+1} \in \{0, 1\}, i = 1, \dots, m-1$ ,

$$\eta = q - \max\{e^{hRe\lambda_k}; k = 1, \dots, m\} = e^{-\lambda_0 h} - e^{hRe\lambda_1} > 0,$$

$$\|\Lambda\| \leq q = e^{-\lambda_0 h} < 1.$$

Матрицу  $\Lambda$  можно и, как правило, предпочтительней выбирать диагональной, полагая  $a_{i,i+1} = 0, i = 1, \dots, m-1$ , при этом матрица  $D$  состоит из собственных векторов матрицы  $A$  (каждому  $j$ -тому столбцу матрицы  $D$  соответствует собственный вектор, отвечающий  $j$ -тому собственному значению).

Осуществим замену зависимых переменных по правилу:  $y(t) = D^{-1}x(t)$ , тогда из (2) следует, что  $y(t_j) = \Lambda y(t_{j-1}) + D^{-1}g_j, j = 1, 2, \dots$ ,

$$g_j = \int_{t_{j-1}}^{t_j} \exp[A(t_j - \tau)] r(x(\tau)) d\tau.$$

При вычислениях требуется использовать, вообще говоря, комплексные вектор-функции  $y(t_j)$  и элементы комплексной матрицы  $D$ , а также соответствующие комплексные интервалы. Исследование показало, что применение обычных прямоугольных интервалов приводит к росту погрешности метода. Интервалы круглой формы позволяют обеспечить устойчивость на бесконечном интервале. По этой причине представим компоненты вектора  $y(t_j)$  в виде

$$y_k(t_j) = y_{k,j}^0 + \rho_k(t_j) \exp[i\varphi_k(t_j)], k = 1, \dots, m; j = 1, 2, \dots; i^2 = -1,$$

где значения  $y_{k,j}^0$  находятся при помощи соотношений:

$$y_{k,j}^0 = \sum_{l=1}^m \Lambda_{k,l} y_{l,j-1}^0 + d_{k,l}^{(-1)} \text{mid}(G_{l,j}), k = 1, \dots, m; j = 1, 2, \dots$$

где  $D^{-1} = [d_{k,l}^{(-1)}]_{k,l=1, \dots, m}$ ,  $\text{mid}(G_{l,j})$  — середина интервала  $G_{l,j}$ .

$$G_j = h_j e^{Ah_j} R(X_j^*), G_j = (G_{l,j})_{l=1, \dots, m}.$$

Тогда

$$\rho_k(t_j) \exp[i\varphi_k(t_j)] = \sum_{l=1}^m \Lambda_{k,l} \rho_l(t_{j-1}) \exp[i\varphi_l(t_{j-1})] + d_{k,l}^{(-1)} (g_{l,j} - \text{mid}(G_{l,j})), k = 1, \dots, m; j = 1, 2, \dots$$

Учитывая, что  $|g_{l,j} - \text{mid}(G_{l,j})| \leq 1/2 w(G_{l,j})$ , где  $w(G_{l,j})$  — ширина интервала  $G_{l,j}$ , находим рекуррентные соотношения для вычисления оценок сверху к значениям  $\rho_k(t_j)$ :

$$\rho_{k,j} = \sum_{l=1}^m |\Lambda_{k,l}| \rho_{l,j-1} + 1/2 |d_{k,l}^{(-1)}| w(G_{l,j}),$$

$$k = 1, \dots, m; j = 1, 2, \dots \quad (14)$$

Интервальные оценки  $X_j$  к решению задачи Коши  $x(t_j)$  могут быть вычислены по формуле:

$$X_{k,j} = \sum_{l=1}^m \text{Re}(d_{k,l} y_{l,j}^0) + [-1, 1] |d_{k,l}| \rho_{l,j},$$

$$k = 1, \dots, m; j = 1, 2, \dots \quad (15)$$

Начальные значения оценок вычисляются при помощи соотношений:

$$y_0^0 = D^{-1} \text{mid}(X_0), \rho_{k,0} = 1/2 \sum_{l=1}^m |d_{k,l}^{(-1)}| w(X_{l,0}),$$

$$k = 1, \dots, m; x_0 \in X_0. \quad (16)$$

**Утверждение 3.** При сделанных в п. 2.1 предположениях относительно свойств задачи Коши (1) интервальное решение (14)–(16), также как точное, стремится к нулю при  $t_j \rightarrow \infty$ , а его погрешность удовлетворяет оценке  $\|\rho_j\| = O(\delta + h)$  при  $\delta, h \rightarrow 0$ , где  $\delta$  — погрешность задания начального условия задачи Коши.

**ДОКАЗАТЕЛЬСТВО.** Оценим по норме ширину интервалов  $G_{1,j}$ :

$$\|w(G_j)\| \leq C_{11} (h^2 \|R(X_j^*)\| + h \|w(R(X_j^*))\|) \leq C_{12} (h^2 \|X_j^*\|^2 + h \|X_j^*\| \|w(X_j^*)\|) \leq C_{13} (h^2 + h \|w(X_{j-1})\|),$$

Так как  $w(X_j) = \rho_j$ , то из (14) следует:

$$\|\rho_j\| \leq q \|\rho_{j-1}\| + 1/2 \|D^{-1}\| \|w(G_j)\| \leq q \|\rho_{j-1}\| + C_{14} (h^2 + h \|\rho_{j-1}\|) = (q + C_{14} h) \|\rho_{j-1}\| + C_{14} h^2,$$

$$j = 1, 2, \dots;$$

где при достаточно малом  $h$ :  $q_1 = q + C_{14} h < 1$ , следовательно,  $\|\rho_j\| \leq C_{15} \delta + C_{16} h, j = 1, 2, \dots$ , что и доказывает утверждение.

При использовании предложенного метода шаг интегрирования, также как в традиционных (т.е. вещественных) неявных методах можно выбирать не из условия устойчивости, а только из соображений точности аппроксимации решения.

Повышение порядка точности данных методов возможно при помощи разложения в (2) вектор-функции  $r(x(\tau))$  в ряд Тейлора по степеням  $(\tau - t_{j-1})$  с интервальной оценкой остаточного члена.

**Пример 2.** Рассмотрим систему ОДУ, описывающую переходной процесс в нелинейной электрической цепи:

$$L di/dt + r_{el} i + u_c = 0, i = dq/dt,$$

$$u_c = q/C(q), t > 0; \quad (17)$$

$$i(0) = 0, u_c(0) = u_{c0}, C(q) = C_0 / (1 + kq^2). \quad (18)$$

В результате преобразований система уравнений (17)–(18) приводится к задаче Коши для дифференциального уравнения Дюффинга, описывающего нелинейные колебания [10]:

$$d^2 z / d\tau^2 + a dz / d\tau + z + z^3 = 0,$$

$$\tau > 0; z(0) = q_0 k^{1/2}, dz/d\tau(0) = 0,$$

$$q(t) = z(t(LC_0)^{-1/2}) k^{-1/2},$$

$$a = r_{el} (C_0 / L)^{1/2}, u_{c0} = q_0 / C(q_0).$$

В нормальной форме постановка задачи Коши имеет вид:

$$dx_1 / d\tau = x_2, dx_2 / d\tau = -ax_2 - x_1 - x_1^3, \tau > 0;$$

$$x_1(0) = q_0 k^{1/2}, x_2(0) = 0.$$

где  $z = x_1, dz/d\tau = x_2$ . Задача из примера 1 является частным случаем данной задачи Коши, так как описывает идеальные периодические колебания.

Таким образом,

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & -a \end{bmatrix}, r(x) = \begin{bmatrix} 0 \\ -x_1^3 \end{bmatrix}, R(X) = \begin{bmatrix} 0 \\ -X_1^3 \end{bmatrix}, x \in X.$$

Собственные значения матрицы  $A$  равны:

$$\lambda_1 = [-a - (a^2 - 4)^{1/2}] / 2,$$

$$\lambda_2 = [-a + (a^2 - 4)^{1/2}] / 2.$$

Матрицу  $\text{ext}(At)$  находим по формуле Сильвестра [10]:

$$\exp(At) = [\exp(\lambda_1 t)(A - \lambda_2 E) - \exp(\lambda_2 t)(A - \lambda_1 E)] / (\lambda_1 - \lambda_2).$$

Следовательно,

$$B = \exp(Ah) = \frac{\exp(-ah/2)}{p} \times \begin{bmatrix} a \text{sh}(hp/2) + p \text{ch}(hp/2) & 2 \text{sh}(hp/2) \\ -2 \text{sh}(hp/2) & -a \text{sh}(hp/2) + p \text{ch}(hp/2) \end{bmatrix},$$

$$p = (a^2 - 4)^{1/2}.$$



Преобразующая матрица, соответствующая матрице  $B = \exp(Ah)$ , может быть выбрана в виде:

$$D = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ [\exp(\lambda_1 h) - b_{11}] / b_{12} & [\exp(\lambda_2 h) - b_{11}] / b_{12} \end{bmatrix}.$$

Рассмотрим случай  $a = 53^{1/2}$ , соответствующий аperiodическому разряду конденсатора. Собственные значения матрицы  $A$  равны:  $\lambda_1 = -0,140054945$ ,  $\lambda_2 = -7,140054945$ . Число жесткости равно  $\lambda_2 / \lambda_1 \approx 51$ .

Выбор начального приближения для интервальных оценок решения может быть осуществлен при помощи первого интеграла системы ОДУ, из которого следует, что:  $|z(\tau)| \leq |z(0)|$ ,  $|dz / d\tau| \leq |z(0)| [1 + 1/2z^2(0)]^{1/2}$ .

Графики интервального решения при различных значениях шага интегрирования и виде начальных условий представлены на рис. 1–3 и качественно иллюстрируют степень влияния величины шага на точность аппроксимации и устойчивость численного решения.

При  $t = t_F$ ;  $h = 0,3$ :

$$X_1 = [0.00008; 0.00410], w(X_1) = 0.00418;$$

$$X_2 = [-0.00058; -0.00001], w(X_2) = 0.00059.$$

При  $t = t_F$ ;  $h = 0,15$ :

$$X_1 = [0.00286; 0.00373], w(X_1) = 0.00088;$$

$$X_2 = [-0.00052; -0.00040], w(X_2) = 0.00012$$

Как следует из результатов теоретического анализа и вычислений решение рассматриваемой задачи Коши содержит быстро убывающую компоненту, соответствующую собственному значению  $\lambda_2$ . Начиная с  $\tau \approx 0,5$  решение системы почти полностью определяется медленно убывающей составляющей.

Ограничение на величину шага интегрирования по критерию устойчивости при использовании методов Рунге-Кутты определяется неравенством [10]  $h \leq 2 / |\lambda_2| \approx 0,28$ . Для интервальных методов [1], в силу их известных свойств, имеют место аналогичные или более жесткие ограничения на величину шага.

Как показывают, представленные на рис. 1 результаты, устойчивость численного решения сохраняется и при  $h > 2 / |\lambda_2|$ .

По характеристикам вычислительной эффективности для случая тестовой задачи (17) предложенный метод существенно превосходит интервальные и двусторонние методы [1–2]. Например, при помощи интервального метода [1] того же порядка точности решение на рассматриваемом

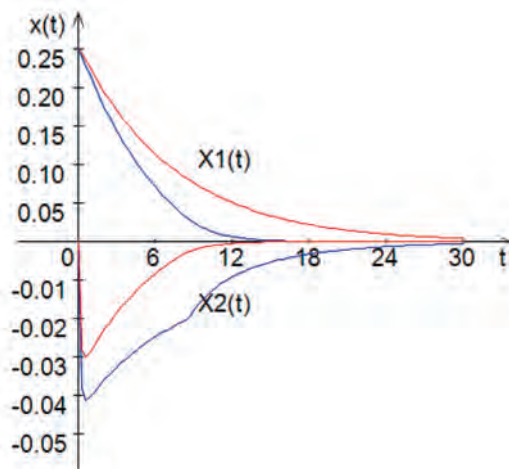


Рис. 1. Интервальное решение при  $t_F = 30$ ;  $h = 0,3$

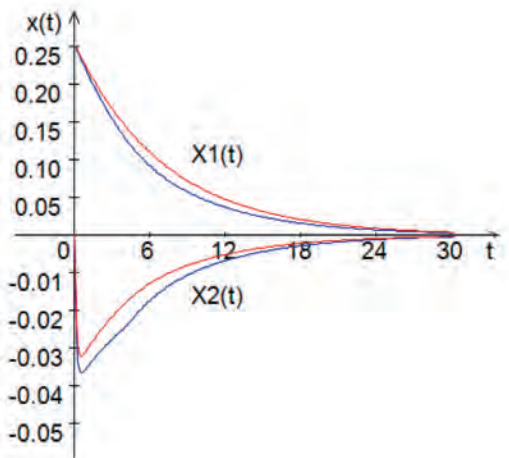


Рис. 2. Интервальное решение при  $t_F = 30$ ;  $h = 0,15$

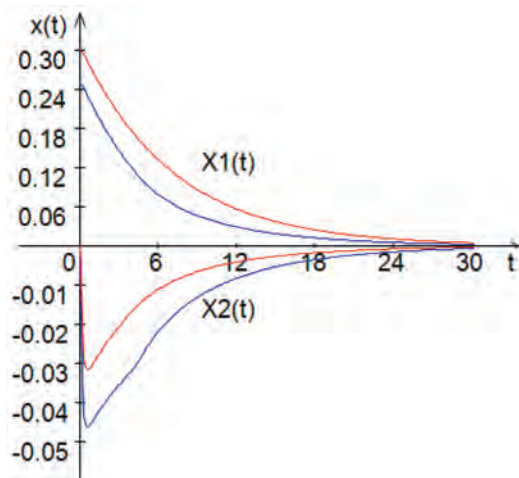


Рис. 3. Двустороннее решение при  $t_F = 30$ ;  $h = 0,15$  и интервальном начальном условии  $x_1(0) \in [0,25; 0,3]$ ,  $x_2(0)=0$

промежутке не удается получить даже при значениях шага интегрирования много меньших  $10^{-6}$ .

### Литература

1. *Калмыков С. А., Шокин Ю. И., Юлдашев З. Х.* Методы интервального анализа. Новосибирск: Наука, 1986. 224 с.
2. *Добронец Б. С., Шайдулов В. В.* Двусторонние методы. Новосибирск: Наука, 1990. 208 с.
3. *Рогалев А. Н.* Границы множеств решений систем обыкновенных дифференциальных уравнений с интервальными начальными данными // *Вычислительные технологии.* 2004. Т. 9. № 1. С. 86–94.
4. *Рогалев А. Н.* Вычисление гарантированных границ множеств достижимости управляемых систем // *Автоматрия.* 2011. Т. 47. № 3. С. 100–112.
5. *Рогалев А. Н.* Вопросы реализации гарантированных методов включения выживающих траекторий управляемых систем // *Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М. Ф. Решетнева.* 2011. № 2 (35). С. 54–58.
6. *Moore R. E., Kearfott R. B., Cloud M. J.* Introduction to interval analysis. Philadelphia: SIAM, 2009. 223 p.
7. *Добронец Б. С.* Интервальная математика. Красноярск: КГУ, 2004. 216 с.
8. *Dobronec B. S.* Two-Sided Solution of ODES via a posteriori error estimates // *Journal of Computational and Applied Mathematics.* 1988. Vol. 23. No. 1. Pp. 53–61.
9. *Волков Е. А.* Численные методы. М.: Наука, 1987. 248 с.
10. *Корн Г., Корн Т.* Справочник по математике. М.: Наука, 1978. 832 с.
11. *Nekrasov S. A.* A bilateral method of solving Cauchy problems // *USSR Computational Mathematics and Mathematical Physics.* 1986. Vol. 26. No. 3. Pp. 83–86.
12. *Nekrasov S. A.* The construction of two-sided approximations to the solution of a cauchy problem // *USSR Computational Mathematics and Mathematical Physics.* 1988. Vol. 28. No. 3. Pp. 23–29.
13. *Nekrasov S. A.* Bilateral methods for the numerical integration of initial- and boundary-value problems // *Computational Mathematics and Mathematical Physics.* 1995. Vol. 35. No. 10. Pp. 1189–1202.
14. *Nekrasov S. A.* Efficient two-sided methods for the Cauchy problem in the case of large integration intervals // *Differential Equations.* 2003. Vol. 39. No. 7. Pp. 1023–1027.
15. *Nekrasov S. A.* A numerical method for solving dynamical systems with lumped parameters which accounts for an input data error // *Journal of Applied and Industrial Mathematics.* 2016. Vol. 10. Issue 4. Pp. 528–537.

---

## BILATERAL METHODS OF INTEGRATING STIFF SYSTEMS OF ORDINARY DIFFERENTIAL EQUATIONS ON THE BASIS OF DUHAMEL INTEGRAL

**TIGRAN R. ARUTYUNYAN,**

Moscow, Russia, rob57@mail.ru

**SERGEY A. NEKRASOV,**

Novocherkassk, Russia, nekrasoff\_novoch@mail.ru

**KEYWORDS:** bilateral method; interval method; error; stability; convergence.

### ABSTRACT

In work the factors causing an error of bilateral and interval methods of the solution of ordinary differential equations are considered. Examples are given to illustrate the exponential nature of the error growth of the considered methods. Comparison with traditional real methods is carried out. An interval method for solving rigid ordinary differential equations systems that is stable on the whole numerical axis. Bilateral methods with a posteriori error estimation with significantly improved computational qualities for the case of large integration intervals are proposed. Describes an interval method for

numerical integration of initial value problems, which is effective for a practically important class of rigid ordinary differential equations systems and has convergence and stability on an infinite interval. The Cauchy problem for an Autonomous nonlinear ordinary differential equations system is considered without limitation of generality. Values of initial conditions are given with an error. It is assumed that the solution of the initial problem exists only and belongs to class C1. Duhamel integral is used to construct the computational method. The use of this formula leads to two types of computational

methods: a multistage interval method based on the solution of the Volterra integral equation.

Convergence and asymptotic stability of the numerical method with respect to perturbations in initial conditions are proved. Another interval method, derived from the Duhamel equation, is a one-step finite difference method in which the interval estimate of the solution at each step is calculated recursively by the values of the corresponding estimate at the previous step. With equal accuracy, the methods have a number of advantages and disadvantages. The first method is algorithmically simple, but the time spent using it increases in proportion to the square of the number of integration steps. The second method is characterized by an order of magnitude smaller total computational cost, linearly dependent on the number of steps of integration as in conventional (i.e. real) methods of integration of odes. However, in General, to ensure the convergence and stability of the second method on the infinite integration interval, a special replacement of variables is required, which complicates the algorithm of calculations. The second method is an interval generalization and development of the so-called semi-analytical method used for the calculation of electrical circuits in the case where the time constants of different parts of the circuit are significantly different. Despite the additional difficulties associated with the calculation of the exponential matrix, this method provides a multiple time gain in practical calculations.

#### REFERENCES

1. Calmykov S.A., Shokin Y.I., Yuldashev Z.H. *Metody interval'nogo analiza* [Methods of interval analysis]. Novosibirsk: Science, 1986. 224 p. (In Russian)
2. Dobronets B.S., Shaidurov V.V. *Dvustoronnii metody* [Bilateral methods]. Novosibirsk: Science, 1990. 208 p. (In Russian)
3. Rogalev.A.N. Bounds of solution sets of differential equations with interval initial data. *Computational Technologies*. 2004. Vol. 9. No. 1. Pp. 86-94. (In Russian)
4. Rogalev.A.N. Calculation of guaranteed boundaries of reachable sets of controlled systems. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. 2011. Vol. 47. No. 3. Pp. 287-296.
5. Rogalev.A.N. Implementation of contributed methods of containment of viable trajectories of controlled systems. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo azerokosmicheskogo universiteta im. akademika M.F. Reshetneva* [Bulletin of Siberian state aerospace University]. Academician M.F. Reshetnev. 2011. No. 2 (35). Pp. 54-58. (In Russian)
6. Moore R.E., Kearfott R.B., Cloud M.J. *Introduction to interval analysis*. Philadelphia: SIAM, 2009. 223 p.
7. Dobronets B.S. *Interval'naya matematika* [Interval mathematics]. Krasnoyarsk: KGU. 2004. 216 p. (In Russian)
8. Dobronec B.S. Two-Sided Solution of ODES via a posteriori error estimates. *Journal of Computational and Applied Mathematics*. 1988. Vol. 23. No. 1. Pp. 53-61.
9. Volkov E.A. *Chislennyye metody* [Numeric's methods]. Moscow: Nauka, 1987. 248 p. (In Russian)
10. Korn. G., Korn T. *Spravochnik po matematike* [Handbook of mathematics]. Moscow: Science, 1978. 832 p. (In Russian)
11. Nekrasov S.A. Two-way method of solving Cauchy. SSSR problems computational *Mathematics and mathematical Physics*. 1986. Vol. 26. No. 3. Pp. 83-86.
12. Nekrasov S.A. Construction of bilateral approximations to the solution of the Cauchy problem. *USSR computational Mathematics and mathematical Physics*. 1988. Vol. 28. No. 3. Pp. 23-29.
13. Nekrasov S.A. Bilateral methods of numerical integration of initial-boundary value problems. *Computational Mathematics and mathematical Physics*. 1995. Vol. 35. No. 10. Pp. 1189-1202.
14. Nekrasov S.A. Effective two-way methods for the Cauchy problem in the case of large integration intervals. *Differential equations*. 2003. Vol. 39. No.7. Pp. 1023-1027.
15. Nekrasov S.A. A numerical method for solving dynamic systems with lumped parameters, taking into account the error in the input data. *Journal of applied and industrial mathematics*. 2016. Vol. 10. Issue 4. Pp. 528-537.

#### INFORMATION ABOUT AUTHORS:

Arutyunyan T. R., Master, Moscow technical University of communications and Informatics;

Nekrasov S.A., PhD, Docent, Professor of applied mathematics, South-Russian state Polytechnic University.

doi: 10.24411/2409-5419-2018-10077

## МЕТОДИКА АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЗАЩИЩЕННОСТЬЮ ВИДОВОЙ ИНФОРМАЦИИ ПУТЕМ ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЕЕ ИЗБЫТОЧНОСТИ

**ВИНОКУРОВ**  
**Александр Владимирович**

### АННОТАЦИЯ

Эффективность функционирования комплексов с беспилотными летательными аппаратами в значительной степени определяется защищенностью (конфиденциальностью, имитостойкостью и помехозащищенностью) информации, циркулирующей в их радиолиниях. Видовая информация, представленная в виде фото и видеоизображений, является одной из основной, циркулирующей в радиолиниях комплексов с беспилотными летательными аппаратами, например, выполняющих задачи фото и видео съемки. Традиционные подходы в виде последовательных операций сжатия видовой информации и последующего применения помехоустойчивого кодирования для защиты от помех в радиолинии эффекта не приносят. Для разрешения противоречия между требованиями по оперативности и достоверности видовой информации в условиях информационного противодействия со стороны противника, предложена методика адаптивного управления ее защищенностью. Предлагается применение технологий искусственного интеллекта и метода обработки видовой информации, поступающей на вход приемника с высокой скоростью в реальном масштабе времени, на основе параметрического представления изображений. Новизна заключается в формировании и подтверждении гипотезы повышения достоверности видовой информации в условиях помех в радиолинии за счет новых технологических операций по ее обработке непосредственно на борту беспилотного летательного аппарата путем частичного сохранения естественной избыточности и использования ее для устранения ошибок канала связи. Для сравнения оригинального и восстановленного изображения было разработано программное средство, вычисляющее пиковое отношение сигнал / шум для двух изображений, на основе среды имитационного моделирования Matlab. Получены зависимости качества видовой информации от битовой ошибки в радиолинии и оценка выигрыша от применения метода параметрической обработки видовой информации. Предложены уровни обработки видовой информации в зависимости от качественного состояния радиолинии.

### Сведения об авторе:

к.т.н., доцент, докторант Краснодарского высшего военного училища им. генерала армии С.М. Штеменко, г. Краснодар, Россия, VAV73@rambler.ru

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** адаптивное управление защищенностью информации; видовая информация; параметрическая обработка; перераспределение избыточности; автоматическая оптимизация.

**Для цитирования:** Винокуров А.В. Методика адаптивного управления защищенностью видовой информации путем перераспределения ее избыточности // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2018. Т. 10. № 3. С. 74-82. doi: 10.24411/2409-5419-2018-10077



В настоящее время технологии обработки видеосигнала развиваются высокими темпами. Исследования вопросов сжатия, защиты от ошибок и передачи видеoinформации в современных телекоммуникационных системах освещаются в научной и технической литературе достаточно подробно. При этом, методы и алгоритмы обеспечения требуемой достоверности и оперативности обработки и передачи фото и видеoinформации в комплексах с беспилотными летательными аппаратами (КБЛА), в условиях преднамеренных помех являются недостаточными.

Используемые модели и методы обработки и защиты видовой информации в КБЛА не разрешают ряда противоречий:

— между увеличением объема видовой информации, необходимой для достоверного принятия решения о характеристиках объекта мониторинга, с одной стороны, и ограниченным временем на ее обработку и передачу, с другой;

— между требуемой скоростью передачи видовой информации, с одной стороны, и пропускной способностью радиолинии в условиях целенаправленных воздействий противника, с другой.

Таким образом, возникает необходимость нахождения баланса между объемом, качеством видовой информации, временем ее обработки и передачи (рис. 1), что определяет необходимость адаптивного реагирования на состояние окружающей среды и помеховой обстановки в тракте передачи «БЛА — НПУ».



Рис. 1. Схема противоречий

**Целью статьи** является решение сформулированных противоречий путем построения адаптивной системы обработки и защиты видовой информации по критерию «достоверность» — «полнота» — «оперативность».

Уменьшение размера видовой информации обеспечивается за счет применения методов ее сжатия. Известен и широко применяется для сжатия и обработки видеопотока способ MPEG-4 со средней степенью сжатия, использующий дискретное косинус-преобразование (ДКП) на этапе сокращения пространственной избыточности [1]. Сканирование видеofрагментов ДКП производится зигзагообразным методом с остановкой на первом нулевом коэффициенте, что не является оптимальным, т.к. не адаптировано к структуре спектров фрагментов исходных

изображений. Способ сжатия видеоданных, в котором применяется трехмерное косинусное преобразование рассмотрен в работе [2]. Основным недостатком является применение фиксированных размеров объемного видеofрагмента ДКП-3D по трем координатам  $x$ ,  $y$  и  $t$ , при этом сканирование элементов выполняется зигзагообразно, что делает данный способ кодирования менее эффективным с точки зрения достигаемого сжатия видеоданных при заданной ошибке передачи и с точки зрения возможности адаптации операций кодирования к статистике исходных изображений. Перспективным методом сжатия видеoinформации является техника, основанная на вейвлет-преобразованиях и широко применяемая в современных Web-камерах в среде Internet [3]. Интерес с точки зрения реализации в аппаратуре БЛА представляют способы обработки видеoinформации, описанный в работе [4].

Анализ рассмотренных, а также других современных методов сжатия видовой информации показывает, что они носят унифицированный характер для сжатия видеозображения динамических сцен и являются избыточными для решения конкретной задачи сжатия видеoinформации, поступающей с фото- видеоаппаратуры БЛА. Кроме того, большой объем служебной информации, передаваемой в общем потоке данных на выходе кодера может составлять более 50% от общего объема данных [5], при этом качество восстановленных изображений является крайне чувствительными к искажению служебной информации. В этой связи известные алгоритмы не обеспечивают удовлетворительное качество восстановления изображений в точке приема в условиях сложной помеховой обстановки. В работах [6, 7] показано, что применение видеостандарта H.264 приводит к следующим зависимостям качества видеоданных от вероятности битовой ошибки  $P_{\text{ош}}$ :

$P_{\text{ош}} \leq 3 \cdot 10^{-5}$  — битовые ошибки не влияют на качество принимаемого видео и легко устраняются механизмами защиты от ошибок на канальном уровне;

$P_{\text{ош}} \leq 10^{-4}$  — обеспечивается превосходное качество видеопотока;

$10^{-4} \leq P_{\text{ош}} \leq 4 \cdot 10^{-4}$  — обеспечивается хорошее качество видеопотока;

$4 \cdot 10^{-4} \leq P_{\text{ош}} \leq 8 \cdot 10^{-4}$  — обеспечивается удовлетворительное качество;

$8 \cdot 10^{-4} \leq P_{\text{ош}} \leq 10^{-3}$  — плохое качество видеопотока;

$P_{\text{ош}} \geq 10^{-3}$  — очень плохое качество видеопотока.

Повысить достоверность видовой информации при ее передаче по радиоканалу возможно путем применения методов помехоустойчивого кодирования [8]. Однако, внесение дополнительной кодовой избыточности для восстановления видеозображений приводит к существенному увеличению объема передаваемой информации, что обуславливает применение кодов Рида-Соломона и циклических кодов [9–10].

Построим модель обработки и защиты информации видовой информации на основе теоретико-множественного подхода в виде:

$$A_{\text{си}} = (V_{\text{вх}}, V_{\text{цн}}, V_{\text{вых}}, Y, Y', K_e, f_{\text{по}}, f_{\text{сж}}, f_{\text{кр}}, f_{\text{пк}}, f_{\text{пк}}^{-1}, f_{\text{кр}}^{-1}, f_{\text{сж}}^{-1}),$$

где  $V_{\text{вх}}, V_{\text{цн}}, V_{\text{вых}}, Y, Y', K_e$  — конечные множества:

- входных потоков  $v_{\text{вх}} \in V_{\text{вх}}$ ;
- изображений целевых нагрузок  $v_{\text{цн}} \in V_{\text{цн}}$ ;
- сжатых изображений  $v_{\text{вых}} \in V_{\text{вых}}$ ;
- зашифрованных изображений  $y \in Y$ ;
- помехозащищенных изображений  $y' \in Y'$ ;
- ключей криптозащиты  $k_e \in K_e$ ;

- $f_{\text{по}}$  — функция предварительной обработки,  $f_{\text{по}}: V_{\text{вх}} \rightarrow V_{\text{цн}}$ ;
- $f_{\text{сж}}$  — функция окончательной обработки,  $f_{\text{сж}}: V_{\text{цн}} \rightarrow V$ ;
- $f_{\text{кр}}$  — функция криптозащиты,  $f_{\text{кр}}: V \rightarrow Y$ ;
- $f_{\text{пк}}$  — функция помехоустойчивого кодирования,  $f_{\text{пк}}: Y \rightarrow Y'$ ;
- $f_{\text{пк}}^{-1}$  — функция декодирования,  $f_{\text{пк}}^{-1}: Y' \rightarrow Y$ ;
- $f_{\text{кр}}^{-1}$  — функция снятия криптозащиты,  $f_{\text{кр}}^{-1}: Y \rightarrow V$ ;
- $f_{\text{сж}}^{-1}$  — функция декомпрессии,  $f_{\text{сж}}^{-1}: V \rightarrow V_{\text{вх}}$ .

Функционально-временная зависимость обеспечения требуемых показателей качества видовой информации на этапах ее обработки представлена на рис. 2.

Оперативность прохождения видовой информации  $T_o$  будет зависеть от скорости обработки и размера видеoinформации и определяется следующим образом

$$T_o = \sum_{i=1}^s \frac{N_i}{U_i},$$

где  $i = \overline{1,5}$  — порядковый номер этапа обработки видовой информации;

$U_i$  — скорость обработки видовой информации на  $i$ -ом этапе обработки;

$N_i$  — объем видовой информации на  $i$ -ом этапе обработки.

Постановка задачи заключается в максимизации вероятности правильного приема видовой информации

$$\max P_{\text{пр}}$$

Ограничения:

на время решения отдельных задач по обработке видовой информации

$$t_i \leq \tau_i, \quad i = \overline{1,5}$$

где  $\tau_i$  — допустимое время на выполнение  $i$ -го этапа обработки;

на общее время прохождения видовой информации

$$\sum_{i=1}^s t_i \leq T_d.$$

Решение задачи предлагается путем использования свойств видовой информации с точки зрения ее содержания и условий фото и видеосъемки. Изображения природного (естественного) характера являются с непрерывным тоном и могут содержать области, в которых цвет кажется глазу непрерывно меняющимся. В результате съемки искусственных объектов, машин и т.д. получают дискретно-тоновые изображения. Так как пиксели таких изображений бывают одиночными или сильно меняют свои значения, то они плохо сжимаются методами с потерей данных. Соответственно целесообразно применение методов, которые разделяют изображение на непрерывно-тоновую и дискретно-тоновую части и сжимать их по отдельности с разным коэффициентом сжатия и уровнем потери качества.

Постановка задачи определяется следующими условиями:

объекты мониторинга, в основном, менее динамичны по сравнению со скоростью БЛА (полезной нагрузки);

для ЛПР требуется не высокое разрешение исходного изображения (видео), а высокая степень детализации объ-



Рис. 2. Схема декомпозиции показателей качества информации по этапам ее обработки

екта (цели) мониторинга и оперативность его получения за время, не превышающее актуальности информации;

максимально допустимый объем передаваемой информации определяется пропускной способностью канала связи.

Стратегии решения задачи:

уменьшение объема видовой информации без снижения ее ценностного аспекта;

адаптация объема видовой информации к пропускной способности канала связи;

сохранение части естественной избыточности видовой информации для ее использования при передаче по радиоканалам низкого качества.

Методическим базисом решения задачи является управление защищенностью видовой информации путем перераспределения ресурсов («интеллекта») между подсистемой обработки информации и принятия решения на НПУ и подсистемой обработки информации на борту БЛА, а также сохранения естественной избыточности изображений для обеспечения их помехоустойчивости, т.е. перераспределение избыточности видовой информации.

**Целью адаптивного управления защищенностью видовой информации** является повышение ее **защищенности** в условиях деструктивных воздействий нарушителя путем формирования управляющих воздействий по рациональному перераспределению избыточности и корректировке структуры и параметров изображения.

Общая схема управления определяется алгоритмами оценивания и адаптивного регулирования в виде совокупности элементов:

информация о целях блока обработки информации  $\{U^*\}$ , где  $U^*$  — цель управления. Задача управления защищенностью информации сводится к виду

$$\Delta U = U^* - U \rightarrow \min;$$

информация (прогнозирование) о состоянии радиолинии  $\{Z\}$ , где  $f(Z)$  — функция зависимости вероятности битовой ошибки  $P_{\text{ош}}$  от помеховой обстановки в радиолинии;

анализ полученной информации и выработка целенаправленных информационных и технологических решений, корректировка параметров входной информации  $\{V_{\text{ин}}\}$ ;

доведение управляющих воздействий  $\{R\}$ .

информация о результатах управления (оценки результатов воздействия)  $\{U\}$ .

На рис. 3 представлена модель управления защищенностью информации в виде системы автоматической оптимизации

В представленной модели (см. рис. 3) множество  $R$  управляющих воздействий представлено:

$r_1$  — параметр, определяемый качеством оптической линии  $r_{\text{опт}}$  и состоянием радиоканала  $r_{\text{ра}}$

$$r_1 = f(r_{\text{опт}}, r_{\text{ра}});$$

$r_2$  — параметр управления алгоритмами обработки информации  $\{1..n\}$ , где  $n$  — количество уровней обработки специальной информации;

$r_3$  — параметр, определяющий допустимый размер изображения  $L(V_{\text{доп}})$ ;

в блоке оценки сравнивается желаемое качество изображения  $V^*$  и действительное состояние  $V$  за счет определения его объема ( $L(V)$ ). В результате формируется параметр управления  $r_4$  как функция невязки:

$$r_4 = f(V - V^*).$$

Ограничением модели является ее статическое описание.

Адекватность модели подтверждается ее построением на основе модели с обратной связью с регулируемым в реальном масштабе времени коэффициентами (регулятор Астрона), апробированной для решения подобных задач теории адаптивных систем управления.

Полнота модели определена включением в нее всех связей, необходимых и достаточных для решения поставленной задачи корректировки параметров блока обработки информации.

Для решения задачи идентификации изображений предлагается применение технологий искусственного интеллекта, в частности, искусственных нейросетей, обоснованием применения которых, является [11–12]:

возможность решения трудно формализуемых задач, в которых совместно используются данные логически несовместимой природы, неполные, «зашумленные», некорректные;

способность восстановления утраченных данных;

хорошая сочетаемость с традиционными вычислительными алгоритмами обработки информации, позволяющая строить сложные системы управления с максимальной надежностью, адаптивностью и с минимумом расходуемых ресурсов.

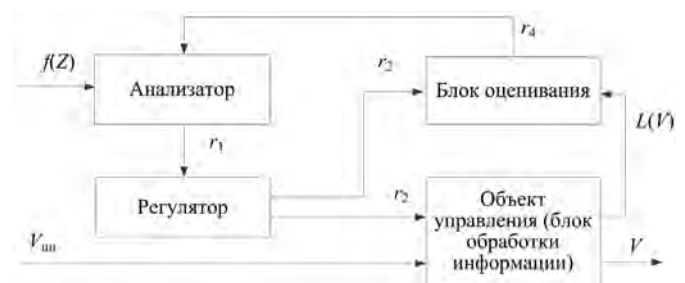


Рис. 3. Модель управления защищенностью специальной информации

На рис. 4 представлена модель обработки видовой информации на основе комплексного применения двух нейросетей.

В общем виде процесс адаптивного управления защищенностью видовой информации представлен следующими этапами:

**1. Этап оценивания.**

Изучение состояния оптического канала, радиолинии и деструктивных возможностей противника.

**2. Этап параметрической идентификации.**

Применение алгоритмов параметрического метода обработки информации (сегментация изображения, идентификация объектов, параметрическое представление изображений, фрагментация) [13–14].

Для выделения контуров на изображениях применим градиентный метод, основанный на процедурах пространственного дифференцирования посредством использования различных дифференциальных операторов: Робертса, Собеля, Кирша, Превита и др. [15]. Для решения частной

задачи обнаружения и распознавания цели мониторинга, характеризующейся яркостным контрастом относительно фона и по особенностям внешней формы, другими характеризующими признаками и их совокупностью, определения принадлежности к определенному классу, используем нейронную сеть с обратным распространением ошибки. Основу статистического подхода к задаче классификации образов составляет Байесовская теория принятия решений.

Результатом успешной идентификации целей будут массивы пикселей, соответствующие их изображениям. Этим массивам присваивается максимальный коэффициент значимости, к оставшимся фрагментам изображения применяется алгоритм объединения пикселей и уменьшения разрешения изображения. Демонстрация примера, приведена на рис. 5.

В результате применения параметрического метода обработки информации для данного примера объем изображения уменьшился с 43 до 37 кБ (см. рис. 5).

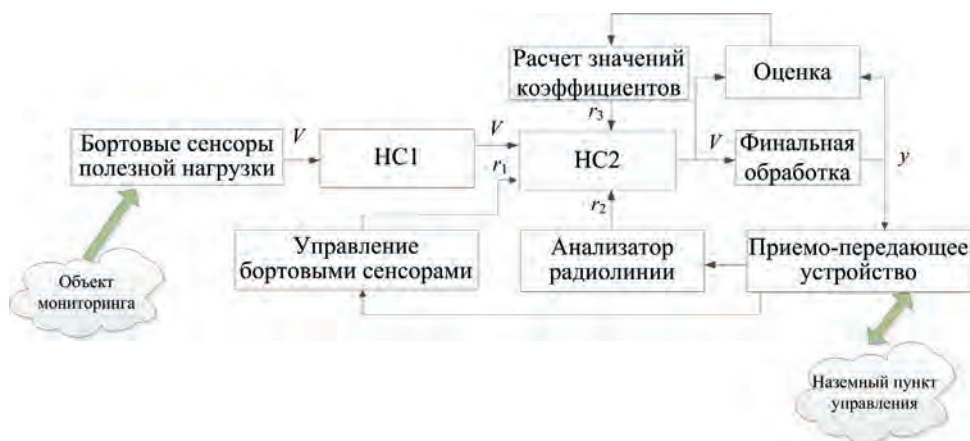


Рис. 4. Модель двухуровневой нейросети обработки видовой информации



Рис. 5. Исходное и обработанное изображения



### 3. Этап управления.

Регулирование настройки кодека. В блоке оценки формируется управляющая команда на принятие следующих решений:

- принятие объема изображения;
- применение алгоритма адаптации путем сохранения естественной избыточности изображения.



Рис. 6. Блок-схема методики адаптивного управления защищенностью видовой информации

### 4. Этап оптимизации.

Адаптация размера и качества изображения пропускной способности радиолинии.

На данном этапе решается оптимизационная задача выбора параметров кадра изображения  $V_k$ , где  $V_k = a \cdot b \cdot c$  — объем кадра, бит;  $a$  — ширина кадра, пикс.;  $b$  — высота кадра, пикс.;  $c$  — количество бит на 1 пиксель изображения (кадра) (глубина пикселей).

Методика адаптивного управления защищенностью видовой информации в виде блок-схемы алгоритма схематично приведена на рис. 6.

Оценку точности изображений можно оценить через среднеквадратическую ошибку (СКО, MSE), которая равна среднему квадратов ошибок (разностей пикселей) двух изображений

$$\text{СКО} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (A_i - B_i)^2,$$

где  $A_i$  — пиксели исходного изображения;  
 $B_i$  — пиксели восстановленного изображения.

Для оценки расхождения восстановленных и исходных изображений воспользуемся метрикой пикового отношения сигнал/шум (PSNR):

$$\text{PSNR} = 20 \ln \frac{\max_i |A_i|}{\text{RMSE}},$$

где RMSE — корень среднеквадратической ошибки MSE, который равен среднему квадратов ошибок (разностей пикселей) двух изображений

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (A_i - B_i)^2}.$$

Для оценки эффективности предлагаемых решений воспользуемся таблицей сравнения объективной (PSNR) и субъективной (MOS) оценки качества изображений [6].

Таблица 1

Соответствие объективной (PSNR) и субъективной (MOS) оценки качества изображений

PSNR, дБ	MOS, %	Качество
> 37	81 – 100	Отличное
32 – 37	61 – 80	Хорошее
26 – 31	41 – 60	Удовлетворительное
20 – 25	21 – 40	Низкое
< 20	0 – 20	Плохое

Для сравнения оригинального и восстановленного изображения было разработано программное средство и использовалась функция для системы Matlab, вычисляющая PSNR для двух изображений [3].

Графики зависимостей PSNR от битовой ошибки  $P_e$  для исходных изображений (график Исх) и после их обработки (график Рез) представлены на рис. 7.

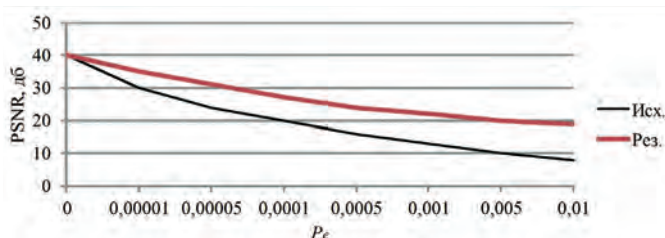


Рис. 7. Графики зависимости PSNR от битовой ошибки

Анализ графиков (рис. 7) показывает, что выигрыш от применения метода параметрической обработки видовой информации находится в пределах 5–10 дБ, что определяет эффективность его применения при значительном ухудшении помеховой обстановки в радиолинии (при  $P_e < 10^{-3}$ ).

В зависимости от качественного состояния радиолинии предлагаются уровни обработки видовой информации, представленные в табл. 2.

Таблица 2

Уровни обработки видовой информации в зависимости от качественного состояния радиолинии

Уровень	Качественное состояние радиолинии	Применяемые методы обработки специальной информации
1	Отличное	Традиционные методы обработки
2	Очень хорошее	
3	Хорошее	Параметрический метод обработки
4	Нормальное	
5	Удовлетворительное	Адаптивное управление защищенностью
6	Плохое	
7	Неудовлетворительное	

Как видно из табл. 2, при высоком качестве радиолинии, что соответствует функционированию КБЛА в повседневных условиях, дополнительных мер по обработке и защите видовой информации не требуется. При ухудшении состояния радиолинии по естественным причинам или при непосредственном информационном противодействии со стороны противника применение параметрического метода обработки видовой информации и методики адаптивного

управления ее защищенностью позволит повысить вероятность правильного приема до необходимого уровня.

Таким образом, в статье предложена методика, позволяющая за счет сочетания структурных, параметрических математических представлений объектов мониторинга и математического аппарата нейронных сетей производить обработку видовой информации для выявления ценностной ее составляющей, с дальнейшей многоуровневой обработкой. Преимуществом применяемого параметрического метода является распараллеливание процессов обработки изображения за счет деления его на сегменты и обработки отдельными нейронами сети. Предлагаемые решения по обработке видовой информации с уменьшением количества и корреляции пикселей части изображения, которая не несет ценностную нагрузку, позволяют обеспечить сжатие изображения до уровня, определяемого пропускной способностью радиолинии. Сохранение части естественной избыточности видовой информации и использование ее для устранения ошибок, вызванных помехами в радиолинии, обеспечивает повышение вероятности правильного приема.

## Литература

1. Ричардсон Я. Видеокодирование. H.264 и MPEG-4 — стандарты нового поколения: пер с англ. М.: Техносфера, 2006. 113 с.
2. Bozinovic N., Konrad J. Scan order and quantization for 3D-DCT coding // In Proc. Of SPIE Vis. Comm. And Im. Proc. 2003. Vol. 5150. Pp. 1204–1215.
3. Сэломон Д. Сжатие данных, изображений и звука: пер с англ. М.: Техносфера, 2004. 368 с.
4. Устинов А. А. Стохастическое кодирование видео и речевой информации: Моногр. В 2 ч. Ч. 1 / под ред. проф. В. Ф. Комаровича. СПб.: ВАС, 2005. 135 с.
5. Прэтт У. К. Цифровая обработка изображений: пер с англ. В 2 кн. М.: Мир, 1982. Т. 1. 311 с.; Т. 2. 480 с.
6. Иванов Ю. А. Оценка качества потокового видеостандарта H.264 / AVC при передаче в нестабильных каналах связи широкополосных сетей беспроводного доступа 4G // Вестник Чувашского университета. 2010. № 3. С. 268–278.
7. Иванов Ю. А., Лукьянцев С. А. Методика оценки качества декодирования видео стандарта H.264/AVC/SVC в беспроводных сетях // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2009. Т. 5. № 4. С. 35–48.
8. Морелос-Сарагоса Р. Искусство помехоустойчивого кодирования. Методы, алгоритмы, применение: пер с англ. М.: Техносфера, 2005. 320 с.
9. Дроздов С. Н., Жиглатый А. А., Кравченко П. П., Скороход С. В., Хусаинов Н. Ш. Об опыте реализации системы видеотрансляции в формате JPEG2000 и перспективах применения стандарта JPEG2000 для передачи видео

и мультиспектральных данных с борта БПЛА // Известия ЮФУ. Технические науки. 2014. № 7. С. 161–170.

10. ITU-T Recommendation T.800. Information Technology — JPEG 2000 Image Coding System: Core Coding System. Approved in 2002–08–01. Geneva: ITU-T Series T: Terminal for Telematic Services, 2003. 212 p.

11. Терехов В. А., Ефимов Д. В., Тюкин И. Ю., Антонов В. Н. Нейросетевые системы управления. СПб: Изд-во С.-Петербургского госуд. университета, 1999. 256 с.

12. Miller W. T., Sutton R. S., Werbos P. J. (Eds.). Neural networks for control. The MIT Press, Cambridge, Mass., 1990. 524 p.

13. Винокуров А. В. Параметрический метод обработки видеoinформации на основе применения нейрон-

ных сетей как механизм адаптации размера изображений к пропускной способности канала связи // Промышленные АСУ и контроллеры. 2017. № 6. С. 36–39.

14. Винокуров А. В., Махов Д. С. Разработка программно-алгоритмического обеспечения адаптивной обработки видеoinформации на борту беспилотного летательного аппарата // Материалы Юбилейной XV Санкт-петербургской международной конференции «Региональная информатика (РИ-2016)» (26–28 октября 2016 г.). СПб.: СПОИСУ, 2016. С. 69.

15. Писаревский А. Н., Чернявский А. Ф., Афанасьев Г. К. Системы технического зрения (принципиальные основы, аппаратное и математическое обеспечение) / Под общ. ред. А. Н. Писаревского, А. Ф. Чернявского. Л.: Машиностроение, 1988. 424 с.

## METHODOLOGY OF ADAPTIVE CONTROL OF PROTECTION OF SPECIES INFORMATION BY REDISTRIBUTION OF ITS EXCESS

**ALEKSANDR V. VINOKUROV,**

Krasnodar, Russia, VAV73@rambler.ru

### ABSTRACT

The effectiveness of the operation of complexes with unmanned aerial vehicles is largely determined by the security (confidentiality, imitating and noise sustainability) of information circulating in their radiolines. Species information, presented in the form of photos and video images, is one of the main, circulating in radiolines complexes with unmanned aerial vehicles, for example, performing tasks of photo and video shooting. Traditional approaches in the form of sequential operations of compression of the species information and subsequent application of noise sustainability coding to protect against interference in the radio link do not bring the effect. To resolve the contradiction between the requirements for efficiency and reliability of species information in conditions of information counteraction from the enemy, a technique for adaptive management of its security was proposed. It proposes the application of artificial intelligence technologies and the method of processing the species information arriving at the receiver input with high speed in real time, based on the parametric representation of the images. The novelty lies in the formation and confirmation of the hy-

**KEYWORDS:** adaptive information security management; species information; parametric processing; redistribution of redundancy; automatic optimization.

pothesis of increasing the reliability of the species information in the conditions of interference in the radio link due to new technological operations for its processing directly on board the unmanned aerial vehicle by partially preserving the natural redundancy and using it to eliminate communication channel errors. To compare the original and restored image, a software tool was developed that calculates PSNR for two images based on the Matlab simulation environment. Dependences of the quality of the species information on the bit error in the radio link and estimation of the gain from the application of the method of parametric processing of the species information are obtained. The levels of processing of the species information are proposed depending on the qualitative state of the radio link.

### REFERENCES

1. Richardson I. A. E. G. H.264 and MPEG-4 Video Compression: Video Coding for Next-generation Multimedia. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd. 2003. 306 p.

2. Bozinovic N., Konrad J. Scan order and quantization for 3D-DCT coding. In Proc. of SPIE Vis. Comm. and Im. Proc. 2003. Vol. 5150. Pp. 1204–1215.
3. Salomon D. *A Guide to Data Compression Methods*. New York: Springer, 2002. 295 p.
4. Yustinov A.A. *Stokhasticheskoe kodirovanie video- i rechevoj informacii* [Stochastic coding of video and voice information. Monogr]. At 2 hours Pt. 1. St. Petersburg: Military Academy of the Signal Corps S.M. Budjonny Publ., 2005. 135 p. (In Russian)
5. Pratt W.K. *Digital image processing*. In 2 book. New York: John Wiley & Sons, 1978. 738 p.
6. Ivanov Yu.A. Evaluation of the quality of the H.264 / AVC streaming video standard for transmission of 4G wireless broadband access networks in unstable communication channels. *Vestnik Chuvashskogo universiteta* [Bulletin of the Chuvash University]. 2010. No. 3. Pp. 268–278. (In Russian)
7. Ivanov Yu.A., Lukyantsev S.A. A technique for assessing the quality of H.264 / AVC / SVC video decoding in wireless networks. *Electrical and data processing facilities and systems*. 2009. Vol. 5. No. 4. Pp. 35–48. (In Russian)
8. Morelos-Zaragoza R.H. *The Art of Error Correcting Coding*. Wiley, 2002. 238 p.
9. Drozdov S.N., Zhiglaty A.A., Kravchenko P.P., Skorokhod S.V., Khusainov N. Sh. On the experience of realizing the video transmission system in JPEG2000 format and the prospects of using the JPEG2000 standard for video transmission and multispectral data from the UAV. *Izvestiya SFedU. Engineering sciences*. 2014. No. 7. Pp. 161–170. (In Russian)
10. ITU-T Recommendation T.800. Information Technology – JPEG 2000 Image Coding System: Core Coding System. Approved in 2002–08–01. Geneva: ITU-T Series T: Terminal for Telematic Services, 2003. 212 p.
11. Terekhov V.A., Efimov D.V., Tyukin I. Yu, Antonov V.N. *Nejrosetevye sistemy upravlenija* [Neural network control systems] St. Petersburg: Saint Petersburg University Publ., 1999. 256 p. (In Russian)
12. Miller W.T., Sutton R.S., Werbos P.J. (Eds.). *Neural networks for control*. The MIT Press, Cambridge, Mass., 1990. 524 p.
13. Vinokurov A.V. Parametric method of processing video information based on the use of neural networks as a mechanism for adapting the image size to the bandwidth of the communication channel. *Industrial Automatic Control Systems and Controllers*. 2017. No. 6. Pp. 36–39. (In Russian)
14. Vinokurov A.V., Makhov D.S. *Razrabotka programmno-algoritmicheskogo obespechenija adaptivnoj obrabotki videoinformacii na bortu bespilotnogo letatel'nogo apparata* [Development of software and algorithmic support for adaptive processing of video information on board an unmanned aerial vehicle]. Proceedings of the Conference of Regional Informatics «RI-2016» (St. Petersburg, 26–28 October 2016). St. Petersburg: SPOISU, 2016. 69 p. (In Russian)
15. Pisarevsky A.N. Chernyavsky A.F., Afanasyev G.K. *Sistemy tehničeskogo zrenija (principal'nye osnovy, apparatnoe i matematicheskoe obespechenie)* [Systems of technical vision (fundamental principles, hardware and mathematical support)]. Leningrad: Mashinostroenie, 1988. 424 p. (In Russian)

**INFORMATION ABOUT AUTHOR:**

Vinokurov A.V., PhD, Docent, Doctoral Candidate of the Krasnodar Higher Military School named after army General S.M. Schtemenko.

---

**For citation:** Vinokurov A.V. Methodology of adaptive control of protection of species information by redistribution of its excess. *H&ES Research*. 2018. Vol. 10. No. 3. Pp. 74–82. doi: 10.24411/2409-5419-2018-10077 (In Russian)



ООО «ИНТЕХ»  
ОАО «НПО АНГСТРЕМ»

30 октября 2018

МОСКВА

# ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

ПО ТЕОРЕТИЧЕСКИМ И ПРИКЛАДНЫМ  
ПРОБЛЕМАМ РАЗВИТИЯ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ  
АСУ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

## НАУКА И АСУ - 2018

[nauka-i-asu.ru](http://nauka-i-asu.ru)

[konferencia\\_asu\\_vka@mail.ru](mailto:konferencia_asu_vka@mail.ru)

при информационной поддержке



НПЦ ИРС

H&ES  
RESEARCH



T•Comm

ТЕЛЕКОМУНИКАЦИИ И ИНТЕРНЕТ

doi: 10.24411/2409-5419-2018-10078

# УЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ОБНАРУЖЕНИЯ ПРИ АВТОМАТИЗИРОВАННОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ И ОЦЕНКЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОМПЛЕКСНЫХ СИСТЕМ БЕЗОПАСНОСТИ ОБЪЕКТОВ

**ДАВИДЮК**  
**Надежда Валерьевна<sup>1</sup>**

**ВЫБОРНОВА**  
**Ольга Николаевна<sup>2</sup>**

## АННОТАЦИЯ

В работе в рамках вопросов автоматизации процессов создания, эксплуатации и оценки эффективности комплексных систем безопасности различного рода объектов внимание сосредоточено на подсистеме обнаружения, как ключевой при обеспечении своевременности и достоверности идентификации попыток реализации угроз, а, следовательно, напрямую влияющей на эффективность системы безопасности объекта.

В частности, рассмотрена частная задача учета технических характеристик средств обнаружения попыток реализации угроз путем формализованного описания формируемых ими зон обнаружения. В качестве примера представлено получение аналитического описания зон обнаружения таких классов технических средств обнаружения, широко применяемых в комплексных системах безопасности, как инфракрасных (активных и пассивных) и радиотехнических. При этом после предварительного анализа и систематизации сведений об указанных классах технических средств и их тактико-технических характеристиках получены универсальные выражения, охватывающие все возможные вариации формирования ими зон обнаружения, а именно: для пассивных инфракрасных средств обнаружения – объемная многоярусная диаграмма, от которой возможен переход к любым частным случаям, например, поверхностной одноярусной зоне обнаружения, зоне обнаружения типа сплошной занавес и т.д., для активных инфракрасных средств – описание совокупности параллельных ИК-лучей, расходящихся от нескольких источников, зона обнаружения типа плоскостной лучевой барьер; для радиотехнических средств обнаружения – зоны обнаружения типа эллипсоид вращения, «капля», эллиптическая канальная поверхность и т.д.

Представленный способ формализации зон обнаружения технических средств обнаружения в составе комплексной системы безопасности позволяет учесть их технические характеристики и алгоритмизировать процедуры автоматизированного проектирования подсистем обнаружения и оценки эффективности получившейся комплексной системы защиты, а также может найти применение при синтезе систем поддержки принятия решений для обеспечения безопасности различного рода объектов.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** комплексная система безопасности; подсистема обнаружения; техническое средство обнаружения; тактико-техническая характеристика; радиотехническое средство обнаружения; инфракрасное средство обнаружения; оценка эффективности; зона обнаружения.

## Сведения об авторах:

<sup>1</sup>к.т.н., доцент Астраханского государственного технического университета, г. Астрахань, Россия, davidyuknv@bk.ru

<sup>2</sup>старший преподаватель Астраханского государственного университета, г. Астрахань, Россия, olga.vyb.90@gmail.com johntit@mail.ru

**Для цитирования:** Давидюк Н.В., Выборнова О.Н. Учет характеристик технических средств обнаружения при автоматизированном проектировании и оценке эффективности комплексных систем безопасности объектов // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2018. Т. 10. № 3. С. 84-92. doi: 10.24411/2409-5419-2018-10078

Актуальность вопросов автоматизации процессов при создании и эксплуатации комплексных систем безопасности объектов обусловлена практическими потребностями, особенно в случаях масштабных и территориально распределенных объектов защиты [15].

В комплексных системах безопасности различного рода объектов защиты, в том числе объектов информатизации, особо важную роль играет подсистема обнаружения, позволяющая своевременно и достоверно идентифицировать попытки реализации угроз. Соответственно, эффективность выполнения подсистемой обнаружения своих целевых задач напрямую коррелирует с эффективностью всей системы безопасности [1, 4].

«Чувствительными элементами» в составе любой подсистемы обнаружения являются технические средства обнаружения (СО) попыток реализации угроз различных принципов действия. Тактико-технические характеристики указанных средств определяют характер формирования ими и параметры их зон обнаружения [6, 8].

При автоматизации процедуры оптимального подбора и размещения состава технических СО вторжений и угроз на объекте защиты возникает задача оценки эффективности получившейся конфигурации комплексной системы безопасности, т.е., в частности, оценке эффективности обнаружения угроз системой безопасности как на этапе проектирования, так и эксплуатации [2–4].

Один из подходов к решению указанной задачи — моделирование объекта защиты с возможностью визуализации зон обнаружения совокупности расположенных на объекте средств обнаружения (СО), что позволит получить наглядное представление о его защищенности данным составом СО в любой точке, корректности установки технического оборудования и наличии/отсутствии остаточных уязвимостей [7]. Для практической реализации указанного подхода для всех существующих и используемых СО необходимо решить подзадачу — провести формализацию их зон обнаружения и, таким образом, учесть их технические характеристики.

В работе для возможности дальнейшего учета технических характеристик рассмотрим формализованное описание зон обнаружения классов СО, широко применяемых в комплексных системах безопасности — инфракрасных (активных и пассивных) и радиотехнических.

Самым общим случаем из возможных конфигураций зон обнаружения пассивных инфракрасных средств обнаружения (ИКСО) является объемная многоярусная диаграмма — распределение некоторого количества узких «лучей» в нескольких наклонных плоскостях [10]. Если считать каждый из «лучей» элементарной областью чувствительности, тогда объемную многоярусную зону обнаружения ИКСО в общем случае можно рассматривать как совокупность элементарных областей чувстви-

тельности, распределенных по и внутри конусообразной поверхности по определенному закону. Для описания данной закономерности введем сферическую систему координат. При этом, с целью упрощения математических выкладок, аппроксимируем площадь обнаружения элементарной области сектором концентрического кольца с центром в проекции на горизонтальную плоскость точки местоположения чувствительного элемента (приемника ИК-излучений — П) (рис. 1).

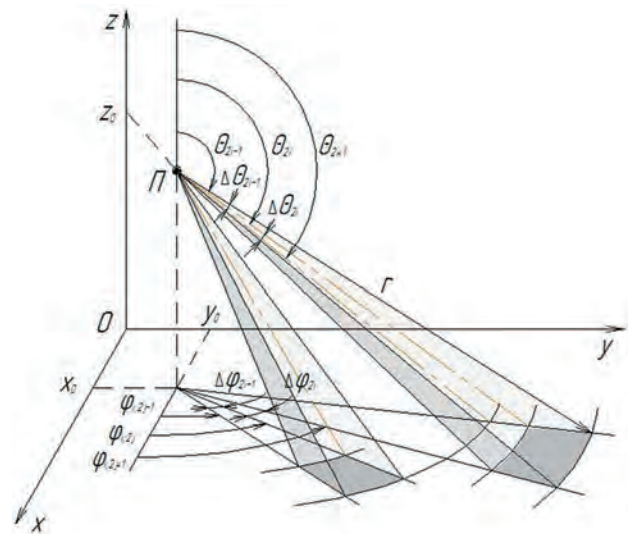


Рис. 1. Многоярусная зона обнаружения ИКСО

На рис.1 введены следующие обозначения:

$O$  — полюс пространства  $(0,0,0)$ , точка расположения чувствительного элемента пассивного ИКСО;

$r$  — полярный радиус, длина луча;

$\theta$  — широта, угол отклонения элементарной зоны чувствительности от вертикали;

$\varphi$  — долгота, угол отклонения вертикальной плоскости луча от плоскости  $xOy$ .

Таким образом, любая точка пространства в сферических координатах может быть задана в виде  $P = (r, \varphi, \theta)$ .

Если учесть принятые допущения, а также то, что  $i$  — номер концентрического кольца;  $j$  — номер элементарной области чувствительности;  $(x_0, y_0, z_0)$  — координаты местоположения чувствительного элемента;  $n$  — общее количество концентрических колец;  $k$  — общее количество элементарных областей чувствительности, математическое описание объемной многоярусной зоны обнаружения пассивных ИКСО представляется следующим образом:



$$\begin{cases} \theta_{2i-1} \leq \theta \leq \theta_{2i} \\ \theta_{2i} = \theta_{2i-1} + \Delta\theta; \theta_{2i+1} = \theta_{2i} + \Delta\theta \\ \varphi_{i(2j-1)} \leq \varphi \leq \varphi_{i(2j)} \\ \varphi_{i(2j)} = \varphi_{i(2j-1)} + \Delta\varphi_{i(2j-1)}; \varphi_{i(2j+1)} = \varphi_{i(2j)} + \Delta\varphi_{i(2j)}; i \in [1; n]; j \in [1; k]; \\ z = r \cos \phi + z_0 \\ x = r \cos \phi \sin \theta + x_0 \\ y = r \sin \phi \sin \theta + y_0 \end{cases} \quad (1)$$

Для задания объекта защиты могут быть приняты граничные условия вида:

$$f(x_{об}, y_{об}, z_{об}) \geq 0,$$

где  $(x_{об}, y_{об}, z_{об})$  — параметры объекта защиты;  $f(x_{об}, y_{об}, z_{об})$  — функция, описывающая контролируемый объем.

Из (1) введением соответствующих ограничений можно получить формализованное описание любых частных случаев конфигурации зон обнаружения пассивных ИКСО. Рассмотрим некоторые из них.

1. Поверхностная одноярусная зона обнаружения (рис. 2).

Аналитически:

$$\begin{cases} \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2 \\ \theta_1 = const; \theta_2 = const \\ \varphi_{2i-1} \leq \varphi \leq \varphi_{2i} \\ \varphi_{2i} = \varphi_{2i-1} + \Delta\varphi_{2i-1} \\ \varphi_{2i+1} = \varphi_{2i} + \Delta\varphi_{2i}; i \in [1; n] \\ z = r \cos \phi + z_0 \\ x = r \cos \phi \sin \theta + x_0 \\ y = r \sin \phi \sin \theta + y_0 \end{cases}$$

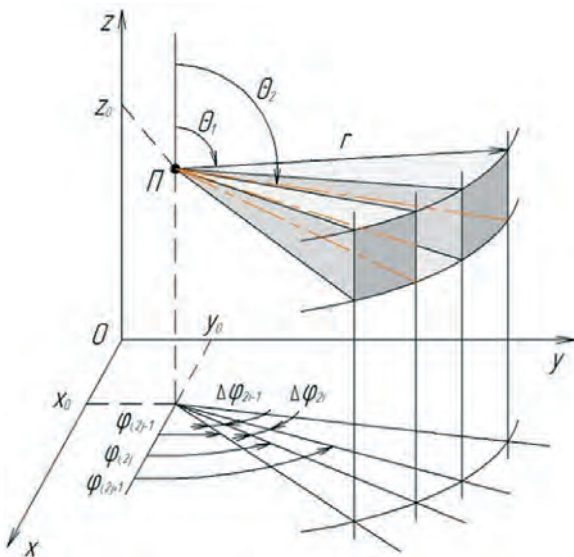


Рис. 2. Поверхностная одноярусная зона обнаружения ИКСО

2. Зона обнаружения типа сплошной занавес (рис. 3).

$$\begin{cases} \theta_1 \leq \theta \leq \pi \\ \theta_1 = const \\ \varphi_{2i-1} \leq \varphi \leq \varphi_{2i} \\ \varphi_{2i} = \varphi_{2i-1} + \Delta\varphi_{2i-1}; \varphi_{2i+1} = \varphi_{2i} + \Delta\varphi_{2i}; i \in [1; n] \\ z = r \cos \phi + z_0 \\ x = r \cos \phi \sin \theta + x_0 \\ y = r \sin \phi \sin \theta + y_0 \end{cases}$$

Аналогичным образом можно получить формализованное описание зон обнаружения активных ИКСО.

В силу физических ограничений на чувствительный элемент приемника любого активного ИКСО попадает поток ИК-излучения, охватываемый только световым диаметром оптической системы [2]. Поэтому элементарной областью чувствительности активного ИКСО будем считать луч диаметром постоянного сечения по всей длине блокируемого участка. Элементарную область чувствительности аппроксимируем отрезком и снова воспользуемся сферической системой координат.

Рассмотрим общий случай вариантов формирования зон обнаружения активных ИКСО — произвольное положение в пространстве одной элементарной области чувствительности (распространение ИК-луча от источника (И) к приемнику (П) в произвольном направлении) (рис. 4).

В принятой системе координат введем следующие обозначения:

полярный радиус  $r$  — протяженность луча (расстояние от источника ИК-излучения до приемника);

долгота  $\phi$  — угол наклона луча в вертикальной плоскости ( $zOy$ );

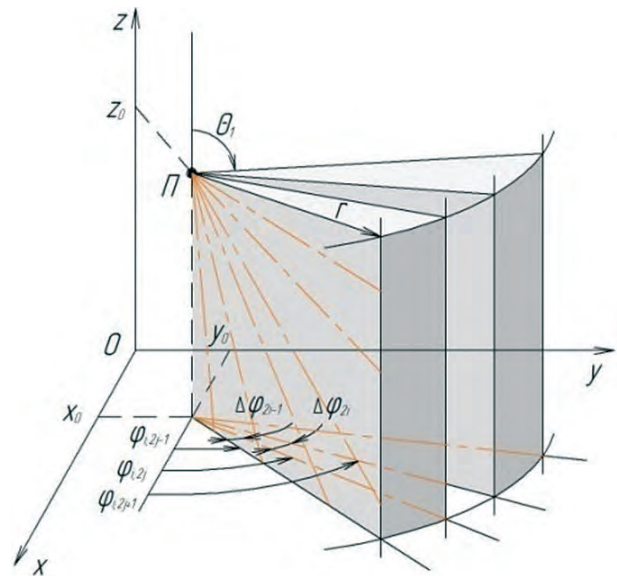


Рис. 3. Зона обнаружения ИКСО типа сплошной занавес



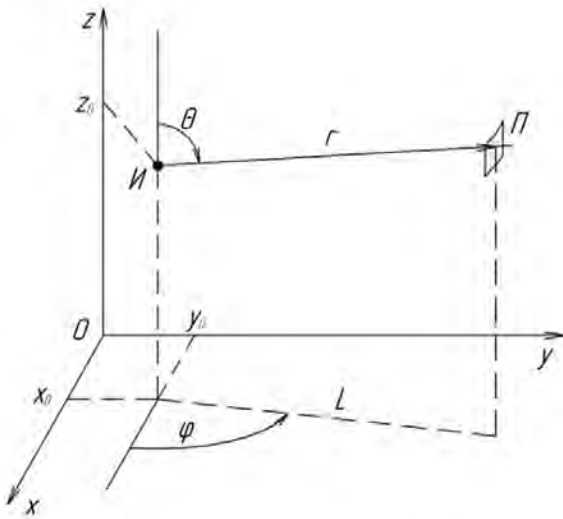


Рис. 4. Распространение ИК-луча от источника в произвольном направлении

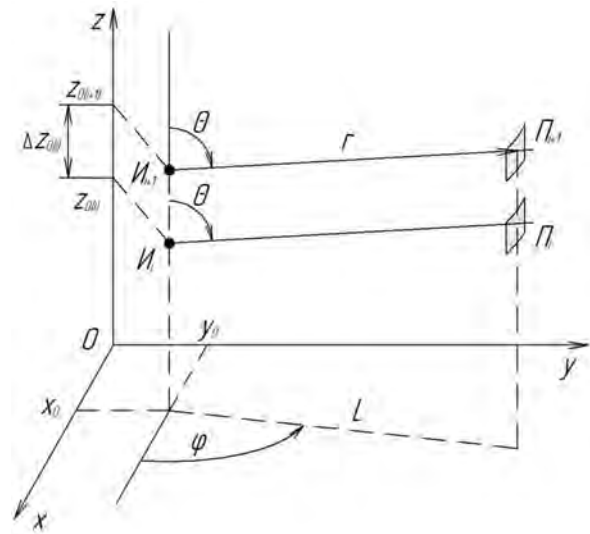


Рис. 5. Совокупность параллельных ИК-лучей, расходящихся от нескольких источников

широта  $\theta$  — угол наклона луча в горизонтальной плоскости ( $xOy$ );

$L$  — линейный размер блокируемого участка (проекция отрезка  $r \sin \theta$  на плоскость  $xOy$ );

$(x_0, y_0, z_0)$  — координаты местоположения источника.

Таким образом, аналитически:

$$\begin{cases} 0 \leq \theta \leq \pi \\ 0 \leq \varphi \leq 2\pi \\ 0 \leq r \sin \theta \leq L \\ z = r \cos \theta + z_0 \\ x = r \cos \varphi \sin \theta + x_0 \\ y = r \sin \varphi \sin \theta + y_0 \end{cases} \quad (2)$$

Аналогично (2) получим аналитические описания ряда других возможных конфигураций зон обнаружения активных ИКСО.

1. Совокупность параллельных ИК-лучей, расходящихся от нескольких источников (рис. 5).

Аналитически:

$$\begin{cases} \theta_i = const; i \in [1; n] \\ \varphi_i = const \\ 0 \leq r \sin \theta \leq L \\ z = r \cos \theta + z_{0(i)}; z_{0(i+1)} = z_{0(i)} + \Delta z_{0(i)} \\ x = r \cos \varphi \sin \theta + x_0 \\ y = r \sin \varphi \sin \theta + y_0 \end{cases},$$

где  $i$  — номер источника или ИК-луча;  
 $n$  — количество источников (лучей).

2. Путем введения ограничений координаты  $z_0$  (либо  $x_0, y_0$  — в зависимости от пространственной ориентации диаграммы направленности средства обнаружения) получим описание зоны обнаружения типа плоскостной лучевой барьер (рис. 6):

Аналитическое описание:

$$\begin{cases} \theta = \bigcup_j \theta_j; j \in [1; k] \\ \theta_j = \bigcup_i \theta_i; i \in [1; n] \\ \theta_{i+1} = \theta_i + \Delta \theta \\ \varphi = const \\ 0 \leq r \sin \theta \leq L \\ z = r \cos \theta + z_{0(j)}; z_{0(j+1)} = z_{0(j)} + \Delta z_{0(j)} \\ x = r \cos \varphi \sin \theta + x_0 \\ y = r \sin \varphi \sin \theta + y_0 \end{cases},$$

где  $j$  — номер источника ИК-излучения;  
 $i$  — номер луча, исходящего от  $j$ -го источника;  
 $n$  — количество лучей от  $j$ -го источника;  
 $k$  — количество источников.

Перейдем к формализованному представлению зон обнаружения радиотехнических СО. Действие радиотехнических СО связано с отслеживанием изменений параметров электромагнитных полей, созданных или отраженных/переотраженных источником угроз. В результате анализа доступных источников произведена классификация и получены характеристики радиотехнических СО, указанные в таблице [6, 11, 14].

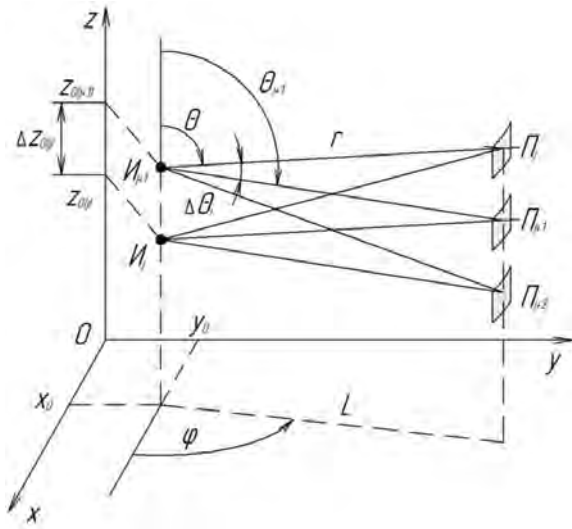


Рис. 6. Зона обнаружения ИКСО типа плоскостной лучевой барьер

Различие между радиоволновыми и радиолучевыми СО состоит в способе формирования зон обнаружения: радиоволновые используют ближнюю зону распространения радиоволн (менее  $10\lambda$ ,  $\lambda$  здесь и далее — длина волны), радиолучевые — дальнюю (более  $100\lambda$ ). В общем случае форма ЗО определяется диаграммами направленности передающей и/или приемной антенн и их расположением. Под видом зоны обнаружения понимается геометрическое тело, которым может быть аппроксимирована зона обнаружения конкретного типа СО с учетом некоторых допущений, поскольку при распространении радиоволн образуется сложная интерференционная картина.

Рассмотрим основные выявленные зоны обнаружения радиотехнических СО.

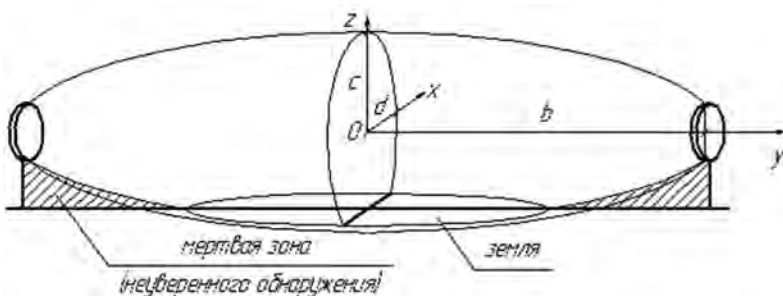
1. Зона обнаружения типа эллипсоид вращения.

На рис. 7 приведен «классический» случай зоны обнаружения, формируемой двухпозиционными радиотехническими средствами. Аппроксимация зоны обнару-

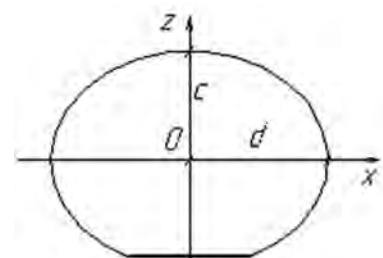
Таблица

Характеристики и классификация радиотехнических СО

Подкласс СО	Радиолучевые			Радиоволновые			Радиопроводные
Рабочий диапазон частот	$f > 1$ ГГц (чаще около 9 ГГц)			$0,1$ ГГц $< f < 1$ ГГц			$f < 0,1$ ГГц (чаще около 40 МГц)
Диапазон длин волн	Область ВЧ-рассеяния (геометрическая оптика)			Резонансная область			Область НЧ-рассеяния (Рэлея)
Принцип действия	Активные	Активные	Пассивные	Пассивные	Активные	Активные	Активные
Конструктивное исполнение	Одно-позиционные	Двух-позиционные	Одно-позиционные	Одно-позиционные	Одно-позиционные	Двух-позиционные	Одно- и двух-позиционные
Вид зоны обнаружения	Капля	Эллипсоид вращения	Капля, эллипсоид вращения	Сфера, капля	Капля	Эллипсоид вращения	Эллиптическая канальная поверхность
Назначение	Объем, площадь	Периметр	Объем, площадь	Объем, площадь, предмет	Объем, предмет	Периметр	Периметр



а)



б)

Рис. 7. Зона обнаружения типа эллипсоид вращения:  
 а) общий вид; б) максимальное по площади поперечное сечение

жения т.н. эллипсоидом, существенным для распространения радиоволн, обусловлена применением принципа Гюйгенса-Кирхгофа и разделением исследуемого пространства на зоны Френеля [12–13].

Согласно известным математическим выкладкам, описание данной зоны обнаружения при  $b > d \neq c$  (ось вращения  $Oy$ ) имеет вид:

$$\frac{x^2}{d^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1 \quad (3)$$

При  $b > d = c$  с учетом допустимых ограничений можно положить, что зона обнаружения определяется максимальным радиусом зоны Френеля (максимальное круговое сечение зоны обнаружения — срединное сечение трассы распространения волн длиной  $\lambda$  или длины блокируемого участка  $l$ ):

$$R_{s \max} = \frac{\sqrt{\lambda \cdot l}}{2} \quad (4)$$

Тогда из (3) и (4) ЗО описывается следующим образом:

$$4 \cdot \frac{(x^2 + z^2)}{\lambda \cdot l} + \frac{4 \cdot y^2}{l^2} = 1 \quad (5)$$

Поскольку подстилающая поверхность (грунт, земля) в большинстве случаев на практике играет роль «диэлектрика», возможно внести усечение ЗО, приняв  $z = h$  в (5).

2. Зона обнаружения типа «капля» (рис. 8) при  $a, \varphi$  — линейных и угловых параметрах зоны обнаружения имеет вид:

Тогда формализованное описание зоны обнаружения типа «капля»:

$$\begin{cases} \sqrt{x^2 + z^2} = \frac{at \cdot (1-t^2)}{1+t^2}; y = \frac{a \cdot (1-t^2)}{1+t^2} \\ t = \operatorname{tg} \varphi; \pi/2 < \varphi < 3\pi/2 \end{cases}$$

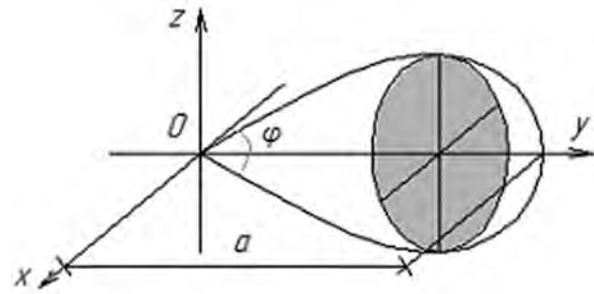


Рис. 8. Зона обнаружения типа «капля»

3. Зона обнаружения типа эллиптическая канальная поверхность формируется радиопроводными СО, для которых при установке в грунт чувствительными элементами служат коаксиальные и др. типы кабелей (т.н. кабельно-волновые СО с эффектом линий вытекающей волны), а при установке только в воздушной среде — проводные чувствительные элементы (например, типа П-274) (проводно-волновые СО) (рис. 9 и рис. 10).

Изготовители считают возможным аппроксимацию сечения образующейся канальной поверхности эллипсом, поэтому в общем случае данную зону обнаружения будем описывать уравнением эллиптической канальной поверхности (рис. 11), полученным с учетом некоторых допущений: траектория движения центра образующего эллипса — плоская кривая, лежащая в плоскости  $z = z_0$ , плоскость эллипса нормальна траектории движения в текущем положении. При этом проводники обычно располагаются в фокусах эллипса.

Опустив некоторые математические выкладки, получим описание данной зоны обнаружения:

$$\begin{cases} x = x(t); y = y(t) \\ \frac{x'}{y'}(x - x_0) + (y - y_0) = 0; \frac{(z - z_0)^2}{a^2} + \frac{(x - x_t)^2}{b^2} + \frac{(y - y_t)^2}{b^2} = 1 \end{cases}$$

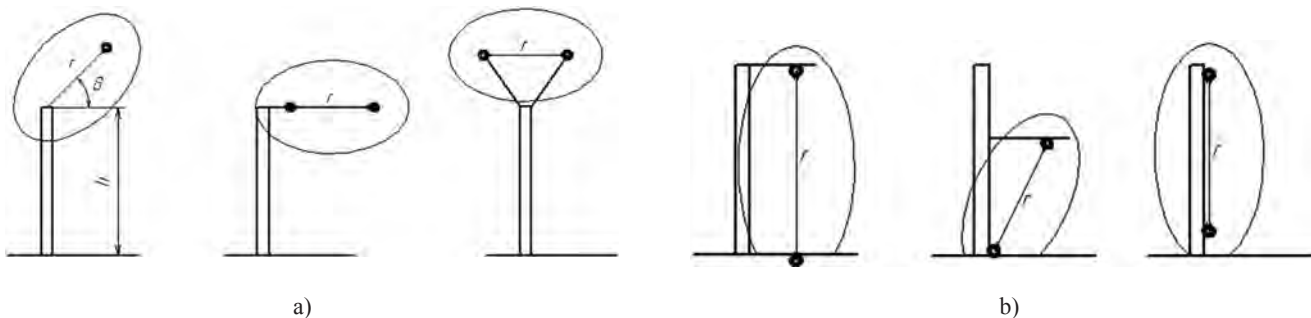


Рис. 9. Размещение проводно-волновых СО: а) свободно-стоящее; б) приземное

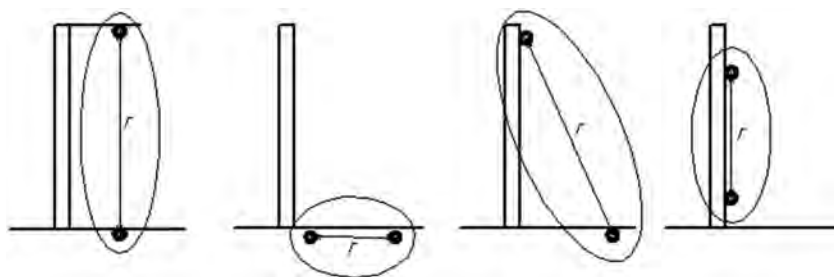


Рис. 10. Размещение кабельно-волновых СО

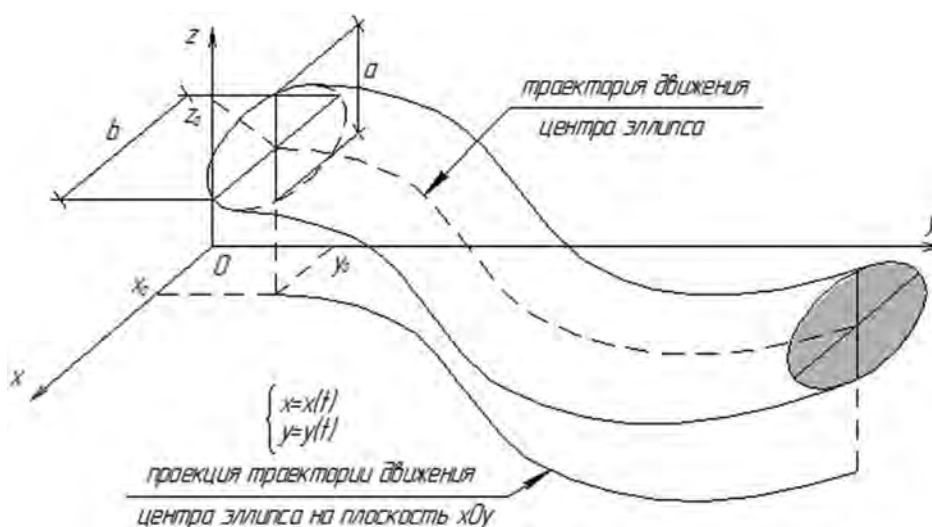


Рис. 11. Зона обнаружения типа эллиптическая канальная поверхность

Частным случаем указанной зоны обнаружения при проводниках, лежащих в одной плоскости прямолинейно, является эллиптический цилиндр. Соотношение расстояния между проводниками и линейными размерами полуосей эллипса известно и представлено в известных источниках и справочниках [8–9, 11].

Аналогичным образом могут быть формализованы и учтены при оценке эффективности системы зоны обнаружения других видов СО.

Таким образом, описанный способ формализации зон обнаружения технических СО в составе комплексной системы безопасности позволяет учесть их технические характеристики и облегчает алгоритмизацию процедур автоматизированного проектирования подсистем обнаружения и оценки эффективности получившейся комплексной системы защиты, а также может быть применен в системах поддержки принятия решений при обеспечении безопасности различного рода объектов [4].

Результатом практической реализации при визуализации формализованных зон обнаружения применяемых на объекте СО может являться наглядная «карта эффективности» обнаружения угроз комплексной системой безопасности для конкретного объекта защиты.

При работе с данной картой как на этапе проектирования системы безопасности, так и на этапе ее эксплуатации, специалист по безопасности, варьируя характеристики СО, меняя состав технических средств или перераспределяя его на объекте, способен оперативно оценить степень «покрытия» объема/площади объекта защиты, а следовательно, оценить эффективность системы, выявить наиболее критические уязвимости и «мертвые зоны» для принятия корректирующих или превентивных управляющих воздействий.

#### Литература

1. Ажмухамедов И.М., Романов Ф.В., Князева О.М. Определение уровня информационной безопасности на



объекте информатизации на основе оценки состояния мер защиты // Вопросы защиты информации. 2015. № 3 (110). С. 66–72.

2. *Алексеев Е.Ю., Дудкин В.А.* Способ омехоустойчивости в инфракрасных системах обнаружения // Вестник Пензенского государственного университета. 2016. № 2 (14). С. 109–116.

3. *Волхонский В.В., Крупнов А.Г.* Особенности разработки структуры средств обнаружения угроз охраняемому объекту // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2011. № 4 (74). С. 131–136.

4. *Волхонский В.В., Малышкин С.Л.* Методика анализа эффективности обнаружения нарушителя средствами систем физической защиты // Информационно-управляющие системы. 2015. № 3 (76). С. 70–75.

5. *Давидюк Н.В., Белов С.В.* Общая схема решения задачи эффективного размещения средств обнаружения на объекте защиты // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2009. Т. 4. № 2 (43). С. 113–118.

6. *Давидюк Н.В., Белов С.В.* Формирование множества характеристик технических средств обнаружения, влияющих на задачу их выбора // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2009. № 2. С. 110–113.

7. *Давидюк Н.В., Сибикина И.В., Космачева И.М.* Процедура оценки показателей обнаружительной способ-

ности системы безопасности // Информация и безопасность. 2012. Т. 15. № 4. С. 537–542.

8. *Anulidakis I.I., Kioupakis F.-E.* Industrial espionage and technical surveillance counter measurers. Cham: Springer, 2016. 125 p.

9. *Bidgoli H.* Handbook of Information Security: Threats, Vulnerabilities, Prevention, Detection, and Management. Vol. 3. Hoboken: John Wiley & Sons, 2006. 1154 p.

10. *Dhar N.K., Dat R., Sood A.K.* Advances in Infrared Detector Array Technology // Optoelectronics — Advanced Materials and Devices. 2013. Pp. 149–190. DOI: 10.5772/51665

11. *Fette B. A.* Cognitive Radio Technology. 2nd ed. Academic Press, 2009. 848 p.

12. *Kraus H. G.* Huygens-Fresnel-Kirchhoff wavefront diffraction formulation: spherical waves // J. Opt. Soc. Am. A. Vol. 6. No. 8. August 1989. Pp. 1196–1205.

13. *Zhenxiu L.* A proof of Huygens' principle // Geohorizons. Jan 2007. Vol. 12. Pp. 31–33. URL: [http://www.spgindia.org/geohorizon/jan\\_2007/huygens\\_principle.pdf](http://www.spgindia.org/geohorizon/jan_2007/huygens_principle.pdf)

14. *Ziboon H.T., Thabit A.A.* A new proposed adaptive cognitive radio detection system based on mlp neural network for different modulation schemes // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2017. Vol. 12. No. 2. Pp. 521–527.

16. *Zyczkowski M., Szustakowski M., Dulski R., Kastek M., Ciurapinski W., Karol M., Markowski P.* Selected issues concerning protection of key installations illustrated on the example of a maritime port // Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza Safety & Fire Technique. 2014. Vol. 35. Issue 3. Pp. 15–24.

## ACCOUNT OF DETECTION DEVICES TECHNICAL CHARACTERISTICS DURING AUTOMATED DESIGN AND EFFECTIVENESS ASSESSMENT OF COMPLEX SECURITY SYSTEMS

**NDEZHDA V. DAVIDYUK,**

Astrakhan, Russia, davidyuknv@bk.ru

**OLGA N. VYBORNOVA,**

Astrakhan, Russia, olga.vyb.90@gmail.com

### ABSTRACT

In the paper within the confines of automating the creating, operating and evaluating the effectiveness of different objects complex security systems, the attention is focused on the detection subsystem, as key to ensuring timeliness and reliability of threats attempts

**KEYWORDS:** complex security system; detection subsystem; threats detecting means; technical detection device; tactical and technical characteristic; infrared detection device (mean); radiotechnical detection device (mean); effectiveness assessment, detection zone.

identifying, and therefore as directly affecting the effectiveness of the whole security system.

In particular, the particular problem of taking into account the threats detecting means technical characteristics through a formal-

ized description of the detection zones they form is considered. As an example, there is an analytical description of the detection zones of such widely used in complex security systems classes of detection equipment as infrared (active and passive) and radiotechnical in the paper. After preliminary analysis and systematization of information about this classes of technical means and their tactical and technical characteristics, the general expressions covering all possible variations in the formation of their detection zones were obtained, namely: for passive infrared detection means – a volumetric multilevel diagram from which a transition to any particular cases (for example, a surface single-stage detection zone, a solid curtain type detection zone, etc.) is possible; for active infrared devices – plurality of parallel infrared rays diverging from several sources, detection zone type "surface rays barrier"; for radiotechnical devices – detection zones such as ellipsoid of revolution, "drop", elliptical channel surface, etc. The way of detection devices zones formalizing within the complex security system presented makes it possible to take into account their technical characteristics and to algorithmize the procedures for automated design of the threats detecting subsystems and of evaluating the resulting integrated protection system effectiveness. It can also be used during the synthesis of decision support systems to ensure the safety of various kinds of objects.

#### REFERENCES

1. Azhmukhamedov I.M., Romanov F.V., Knyazeva O.M. Determining the level of information security in the facility informatization based on assessment of the protection measures. *Voprosy zashhity informacii* [Information security issues]. 2015. No. 3 (110). Pp. 66-72 (In Russian).
2. Alekseev E. Ju., Dudkin V.A. Sposob povysheniya pomohoustojchivosti v infrakrasnyh sistemah obnaruzhenija [Method for increasing noise immunity in infrared detection systems]. *Vestnik Penzenskogo gosudarstvennogo universiteta* [Vestnik of Penza State University]. 2016. No. 2 (14). Pp. 109-116
3. Volkhonskiy V.V., Krupnov A.G. Special features of the threats detectors structure for protected object. *Scientific and technical journal of information technologies, mechanics and optics*. 2011. No. 4 (74). Pp. 131-136.
4. Volkhonskiy V.V., Malyshev S.L. Analysis of Intruder Detection Efficiency in Physical Protection Systems. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems]. 2015. No. 3 (76). C. 70-75.
5. Davidyuk N.V., Belov S.V. The general pattern of solving the problem of effective detectivity sensors disposition on the protected object. *Vestnik Saratov State Technical University*. 2009. Vol. 4. No. 2(43). Pp. 113-118.
6. Davidyuk N.V., Belov S.V. Formation of a set of sensors characteristics affecting the problem of their selection. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics*. 2009. No. 2. Pp. 110-113.
7. Davidyuk N.V., Sibikina I.V., Kosmacheva I.M. The procedure of evaluation informatization object security system's detective ability. *Information and security*. 2012. Vol. 15. No. 4. Pp. 537-542.
8. Anulidakis I.I., Kioupakis F.-E. *Industrial espionage and technical surveillance counter measures*. Cham: Springer, 2016. 125 p.
9. Bidgoli H. *Handbook of Information Security: Threats, Vulnerabilities, Prevention, Detection, and Management*. Vol. 3. Hoboken: John Wiley & Sons, 2006. 1154 p.
10. Dhar N.K., Dat R., Sood A.K. Advances in Infrared Detector Array Technology. *Optoelectronics – Advanced Materials and Devices*. 2013. Pp. 149-190. DOI: 10.5772/51665
11. Fette B.A. *Cognitive Radio Technology*. 2nd ed. Academic Press, 2009. 848 p.
12. Kraus H.G. Huygens-Fresnel-Kirchhoff wave-front diffraction formulation: spherical waves. *J. Opt. Soc. Am. A*. Vol. 6. No. 8. August 1989. Pp. 1196-1205.
13. Zhenxiu L.A. proof of Huygens' principle. *Geohorizons*. Jan 2007. Vol. 12. Pp. 31-33. URL: [http://www.spjindia.org/geohorizon/jan\\_2007/huygens\\_priciple.pdf](http://www.spjindia.org/geohorizon/jan_2007/huygens_priciple.pdf).
14. Ziboon H.T., Thabit A.A. A new proposed adaptive cognitive radio detection system based on mlp neural network for different modulation schemes. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2017. Vol. 12. No. 2. Pp. 521-527.
15. Zyczkowski M., Szustakowski M., Dulski R., Kastek M., Ciurapinski W., Karol M., Markowski P. Selected issues concerning protection of key installations illustrated on the example of a maritime port. *Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza Safety & Fire Technique*. 2014. Vol. 35. Issue 3. Pp. 15-24.

#### INFORMATION ABOUT AUTHORS:

Davidyuk N.V., PhD, Associate Professor of Astrakhan state technical university;  
 Vybornova O.N., Senior Lecturer of Astrakhan state university.



# НПЦ ИРС

Научно-производственный центр  
Информационных региональных систем

▶ [npcirs.ru](http://npcirs.ru)

Закрытое акционерное общество "Научно-производственный центр информационных региональных систем" является предприятием, разрабатывающим автоматизированные системы специального назначения.

## Основными направлениями нашей деятельности являются:

- проектирование, создание и ремонт автоматизированных систем управления и их составных частей, систем обработки данных, программного обеспечения, информационных систем для государственных организаций и коммерческих компаний;
- разработка общесистемного и прикладного ПО, внедрение и сопровождение информационных систем;
- защита информации в системах управления, локальных вычислительных сетях, программно-аппаратных комплексах, телекоммуникационных системах;
- производство и поставка технических средств, в офисном и защищенном исполнении;
- создание, внедрение и сопровождение оперативных и учетных систем любой сложности;
- анализ автоматизированных систем на предмет разработки к ним классификаторов и нормативно-справочной информации;
- разработка проектов и создание глобальных, корпоративных, локальных телекоммуникационных систем и структурированных кабельных сетей.

Создаваемые предприятием средства (комплексы средств автоматизации, программные и программно-информационные комплексы, информационные изделия) эксплуатируются в различных государственных органах: в органах военного управления Министерства обороны РФ, а также на предприятиях, в организациях, в органах местного самоуправления субъектов РФ, занимающихся воинским учетом.

Научные исследования в сфере КНСИ позволяют нам качественно анализировать автоматизированные системы и разрабатывать к ним классификаторы и нормативно-справочную информацию.

## На данный момент уже имеющиеся разработки позволяют:

- создавать классификаторы по единым правилам, независимо от их содержимого;
- создавать массивы классификационной, нормативно-справочной информации в виде эталонных и контрольных экземпляров;
- создавать и вести централизованный банк УММ классификаторов (нормативные документы кодирования сведений);
- комплектовать массивы КНСИ для поставки на объекты, в части касающейся;
- проводить учет КНСИ и поставку на объекты автоматизации;
- централизованно вносить изменения в КНСИ;
- синхронизировать взаимодействие объектов, использующих классификаторы (КНСИ) и УФД;
- обеспечить совместимость данных баз данных объектов;
- обеспечить обмен базами данных между различными автоматизированными системами с территориально разнесенными источниками информации.

Коллектив ЗАО "НПЦ ИРС" образован на основе коллектива Государственного унитарного предприятия. Унаследовав его опыт научно-производственной деятельности, профессиональные знания коллектива специалистов, который целенаправленно занимается проблематикой автоматизации деятельности должностных лиц органов военного управления Вооруженных Сил РФ и разработкой единого информационного обеспечения автоматизированных систем военного назначения более 15 лет, выполняя как теоретические, так и практические работы в этой области.



**НПЦ ИРС**

Научно-производственный центр  
Информационных региональных систем

▶ [npcirs.ru](http://npcirs.ru)

Телефон: 8(800)100-40-90  
E-mail: [administrator@npcirs.ru](mailto:administrator@npcirs.ru)



doi: 10.24411/2409-5419-2018-10079

## ФОТОПЛАНЫ (ОРТОФОТОПЛАНЫ): СУЩНОСТЬ, СОДЕРЖАНИЕ И РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ, СПОСОБОВ И СРЕДСТВ ТРАНСФОРМИРОВАНИЯ СНИМКОВ

**ХРУЩ**  
**Роман Михайлович**

### АННОТАЦИЯ

В работе рассмотрены принципиальные вопросы сущности и содержания фотопланов и ортофотопланов. Доказано, что нет смыслового различия между фотопланами и ортофотопланами. Фотопланы создают на равнинную местность, а ортофотопланы – на горную. По своим пользовательским свойствам они должны отвечать единым требованиям. Различные названия являются следствием применяемых способов и технологий трансформирования снимков, которые особенно проявлялись на этапах развития аналоговой и аналитической фотограмметрии. Исследованы теоретические основы трансформирования аэрокосмических снимков. Показано, что между трансформированным и исходным снимками должно соблюдаться точечное соответствие, базирующееся на основной зависимости для одиночного снимка. Различия в трансформировании снимков равнинной и горной местностей исчезли с внедрением в фотограмметрическую обработку снимков цифровых технологий, позволивших использовать единую методику. В результате обычное цифровое трансформирование стало частным случаем орто-трансформирования. Цифровое трансформирование может выполняться двумя методами: прямым и обратным трансформированием. На практике применяют, как правило, обратное цифровое трансформирование. Главным при этом является перенос оптической плотности (яркости) с исходного снимка на нулевую матрицу (заготовку) трансформируемого снимка. Подчеркивается, что в настоящее время исследования направлены на автоматизацию процесса создания цифровых ортофотопланов – создание их в автоматическом режиме. При этом ключевым моментом является автоматическое отождествление и измерение соответственных (одноименных) точек перекрывающихся снимков для формирования цифровых моделей рельефа. Если эта задача решена, то создание цифрового ортофотоплана в автоматическом режиме становится тривиальной технической задачей. Поэтому исследования в этом направлении являются актуальными и перспективными.

### Сведения об авторе:

к.т.н., доцент, профессор кафедры  
фототопографии и фотограмметрии  
Военно-космической академии  
имени А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург,  
Россия, chrusch@rambler.ru

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** фотоплан; ортофотоплан; цифровое трансформирование; прямое трансформирование; обратное трансформирование.

---

**Для цитирования:** Хрущ Р.М. Фотопланы (ортофотопланы): сущность, содержание и развитие методов, способов и средств трансформирования снимков // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2018. Т. 10. № 3. С. 94-102.  
doi: 10.24411/2409-5419-2018-10079



Фотопланы (ортофотопланы) могут использоваться для решения самых разнообразных задач, как в народном хозяйстве, так и в военном деле. В профессиональной общепринятой терминологии понятия «фотоплан» и «ортофотоплан» не имеют смысловых различий. Скорее всего, здесь сказывается «наследие» технологии создания этого вида продукции. Вначале отметим, что при создании фотоплана (ортофотоплана) решается задача приведения фотоизображения к заданному масштабу, который должен быть одинаковым на всей его площади. Для этого следует устранить при трансформировании снимков смещения его точек за наклон снимка, из-за рельефа и искажения, вызванные физическими факторами (дисторсия объектива, атмосферная рефракция и др.).

Так как искажения на снимках, вызванные физическими факторами, как правило, намного меньше смещений снимков за их наклон и рельеф местности, то при трансформировании снимков обычно устраняют только последние. Специалистам это хорошо известно, но в настоящее время фотопланы (ортофотопланы) используются представителями многих других профессий, которым не всегда понятны тонкости их создания. Поэтому иногда возникает непонимание и различная трактовка сущности и свойств фотопланов и ортофотопланов. В этом собственно состоит задача данной статьи: объяснить смысл, сущность и особенности трансформирования снимков и создания фотопланов (ортофотопланов). Представляется, что это также будет полезно представителям геодезических и других специальностей, изучающих фотограмметрию.

По определению (если отбросить частности) трансформирование есть процесс преобразования наклонного снимка в горизонтальный с соблюдением при этом точечного соответствия [1]:

$$\left. \begin{aligned} x^0 &= f_1(x, y); \\ y^0 &= f_2(x, y); \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $x^0, y^0$  — плоские прямоугольные координаты точек фотоснимка после преобразования (трансформирования);

$x, y$  — плоские прямоугольные координаты точек снимка до преобразования;

$f_1, f_2$  — непрерывные и однозначные функции.

Точное соответствие между двумя плоскостями — это соответствие такого рода, когда какой-либо точке первой плоскости соответствует одна и только одна точка второй плоскости. Именно так происходит при фототрансформировании: каждой точке наклонного снимка соответствует одна точка трансформированного снимка (в данном случае речь идет об аналоговых снимках центральной проекции).

Точечное соответствие, которое является теоретической основой трансформирования снимков, выражается основными формулами для одиночного снимка [2–3]:

$$\left. \begin{aligned} X &= X_s + (Z - Z_s) \frac{X_m}{Z_m}; \\ Y &= Y_s + (Z - Z_s) \frac{Y_m}{Z_m}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Здесь  $X, Y, Z$  — координаты точек местности;

$X_s, Y_s, Z_s$  — координаты центра проекции (точки фотографирования  $S$ );

$X_m, Y_m, Z_m$  — пространственные координаты точек фотоснимка.

Переход от плоских координат точек фотоснимка к пространственным координатам осуществляется посредством направляющих косинусов, являющихся функциями угловых элементов внешнего ориентирования (ЭВО) снимков:

$$\left. \begin{aligned} X_m &= a_1x + a_2y - a_3f; \\ Y_m &= b_1x + b_2y - b_3f; \\ Z_m &= c_1x + c_2y - c_3f. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Для трансформированного снимка зависимость (2) примет вид

$$\left. \begin{aligned} X &= X_s + (Z - Z_s) \frac{x^0}{-f}; \\ Y &= Y_s + (Z - Z_s) \frac{y^0}{-f}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Здесь через  $x^0, y^0$  обозначены координаты точек трансформированного (горизонтального) снимка, другими словами эта зависимость означает, что на трансформированном снимке влияние его углов наклона устранено.

Такое преобразование реализуется в процессе трансформирования снимка, при котором устраняются смещения его точек из-за влияния угла наклона, но при этом на трансформированном снимке остаются смещения точек под влиянием рельефа. При этом желательно получать преобразованный снимок в заданном масштабе. Следовательно, под трансформированием снимка будем понимать преобразование наклонного снимка в горизонтальный снимок заданного масштаба [2–4]. Трансформирование, при котором устраняются смещения из-за угла наклона, но не устраняются смещения, вызванные превышениями точек местности, носит название обычного или коллинеарного трансформирования снимков.

Известно, что снимок только в одном случае тождественен плану или топографической карте — снимок горизонтальный, а местность плоская [2–3]. Поэтому задача преобразования наклонного снимка в горизонтальный имеет важное практическое значение, так как использование снимков для создания топографических карт (в аналоговой или цифровой форме) и в наше время остается

доминирующей и приоритетной задачей применения материалов и данных аэрокосмических съемок.

Здесь отметим, что при коллинеарном трансформировании получают снимки в центральной проекции, но с другими параметрами. Очевидно, что на трансформированном снимке масштаб на всей его площади не будет одинаковым, так как не устранены смещения его точек из-за превышений. При коллинеарном трансформировании проектирование осуществляется на среднюю плоскость, благодаря этому смещения точек из-за рельефа (из-за превышений) уменьшаются и не должны быть больше заданных допусков. Обычно такой допуск равен 0,4 мм, а формула для расчета максимального превышения на местности (высотной ступени зоны), вызывающих смещения не более этого допуска, имеет вид [3]:

$$Q = 0,0008 \frac{f}{r} t, \quad (5)$$

где  $Q$  — высотная ступень зоны;

$r$  — максимальное удаление от точки надира до точки

в пределах рабочей площади трансформирования снимка;

$f$  — фокусное расстояние камеры АФА;

$t$  — знаменатель масштаба трансформированного снимка.

Для примера рассчитаем высотную ступень для трансформирования снимков с целью создания фотоплана (карты) масштаба 1:50 000. Учитывая, что для изготовления фотопланов используются снимки, полученные длиннофокусным АФА, примем  $f = 200$  мм. Расстояние  $r$  для снимков формата 18x18 см в пределах рабочей площади трансформирования равно примерно 70 мм. В таком случае значение  $Q$  получится равным 100 м. Следовательно, и максимальное превышение точек местности, изобразившейся в пределах рабочей площади трансформирования, не может быть больше 100 м. Такая местность относится к категории равнинной и холмистой с преобладающими уклонами местности до 6°.

На этапе применения аналоговых методов коллинеарное трансформирование выполнялось в основном фотомеханическим способом на приборах, которые назывались фототрансформаторами. Известны отечественные фототрансформаторы ФТМ, ФТБ [2]. Производились фототрансформаторами и в других странах. Например, выпускались фототрансформаторы Rectimat и Seg-V (фирма «Оптон», Германия), E-4 (фирма «Вильд»,

Швейцария) и др [2]. При трансформировании снимков фотомеханическим способом могли использоваться два метода: по опорным точкам и по установочным элементам. Однако в основном и, как правило, применялось трансформирование по опорным точкам, которые при трансформировании называются трансформационными точками. При этом трансформационные точки получа-

ют в результате построения сетей фототриангуляции. Но при построении сетей фототриангуляции определяют не только плановые координаты и высоты точек местности, которые используются, в том числе и как трансформационные, но и элементы внешнего ориентирования снимков. При трансформировании элементы внешнего ориентирования снимков применяют для вычисления установочных элементов трансформирования. Но трансформирование снимков по установочным элементам являлось скорее исключением, а не правилом.

Наиболее современными приборами, которые также уходят в историю, являются отечественные фототрансформаторы ФТА и ФПА [2–3]. Фототрансформатор ФТА позволяет выполнять не только коллинеарное трансформирование, но и устранить аффинные искажения. Такие искажения могут возникать при трансформировании длиннофокусных космических снимков, если не представляется возможным соблюсти геометрические условия трансформирования (введение децентрации). Так как устранение аффинных искажений предполагает сжатие или растяжение изображения, то трансформирование снимков выполняется узкими полосками через щель. Следовательно, трансформированный снимок получается в результате последовательного проектирования исходного изображения через узкую щель. Такую же задачу решают и фототрансформаторы ФПА, предназначенные для работы в полевых (походных) условиях.

Трансформированные таким образом снимки, которое называют обычным или коллинеарным трансформированием, используются для создания фотоплана [2,3,4]. Уточним, что коллинеарное трансформирование реализуется проектированием на среднюю плоскость местности, изображенной на снимке, а превышение точек местности в пределах участка рабочей площади трансформирования, как показано выше, ограничивается так, чтобы смещения точек за рельеф не превышали допуска. Это требование может быть соблюдено лишь в том случае, если местность равнинная (холмистая). Следовательно, фотопланы создаются на равнинную местность. Сущность технологии создания фотоплана состоит в монтаже трансформированных снимков (рис. 1).

Исторически фотопланы вначале создавались для выполнения топографической съемки комбинированным методом, который применялся при создании топографических карт на равнинные районы. Затем фотопланы требовались и для решения этой же и других задач не только на равнинные, но и на горные районы. Прежде чем рассматривать трансформирование снимков и создание фотопланов на горные районы, попытаемся выяснить, можно ли и как устранить смещения точек снимков за рельеф.

Если начало системы координат точек местности (см. зависимость 4) совместить с центром проекции ( $X_s = Y_s = 0$ ),



Рис. 1. Фрагмент фотоплана

а также учесть, что  $(Z - Z_s) = -H$ , то уравнения (4) преобразуются и примут вид

$$\left. \begin{aligned} X &= \frac{H_i}{f} x_i^0; \\ Y &= \frac{H_i}{f} y_i^0, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где  $H_i$  — высота фотографирования над точкой местности с номером  $i$ ;

$x_i^0, y_i^0$  — координаты изображения точки местности на трансформированном снимке;

$i$  — номера точек,  $i = 1, 2, \dots, n$ .

Отношение высоты фотографирования точки к фокусному расстоянию снимка  $H_i/f$  — это знаменатель масштаба горизонтального фотоснимка в точке  $i$ . Но так как высоты точек местности меняются от точки к точке (что является причиной смещений точек на снимках из-за превышений), то масштаб горизонтального снимка в разных его точках различный. Анализ зависимости (6) показывает, что смещения за рельеф на трансформированном снимке будут отсутствовать только в том случае, если местность плоская и горизонтальная. Для того чтобы устранить их при трансформировании снимков реальной местности, то преобразования в соответствии с зависимостью (6) необходимо выполнять для каждой точки. Такое преобразование можно выполнить, например, если использовать ортогональное проектирование каждой точки снимка (со своей высоты) на горизонтальную плоскость. В результате будет

получен ортофотоснимок. Технологически выполнить такой процесс, если даже применить современные цифровые технологии обработки снимков, невозможно. Поэтому трансформирование снимков на горную местность было предложено выполнять по частям снимка, и оно получило название дифференциального трансформирования, а затем стало более употребительным ортофототрансформирование (ортотрансформирование).

Использовались различные методы дифференциального трансформирования, например, трансформирование по зонам (снимок делили на части, в пределах которых высоты точек, изображенной на них местности, были в пределах значения  $Q$ ), способ обратной модели и др., что имело место на этапе использования аналоговых методов. Однако это были весьма трудоемкие и не очень точные методы и способы. Поэтому возникла необходимость разработки более эффективных способов трансформирования снимков горной местности. И, естественно, как бывает в таких случаях, они появились.

Один из таких способов, сущность которого заключается в ортогональном проектировании и фиксировании ограниченных участков фотоизображения (в пределах щели) с изменением высоты проектирования для каждого из таких участков. Заметим для непосвященных, что щель ограничивалась не только по ширине (как при аффинном трансформировании), но и по длине. Таким образом, трансформированный снимок получался в результате последовательного ортогонального проектирования небольших участков исходного снимка с изменением высоты проектирования для каждого участка. Естественно, что смонтированные по таким снимкам (ортофотоснимкам) фотопланы стали называть ортофотопланами.

На ортофотоснимке, который получают в ортогональной проекции, максимальное смещение за рельеф будет в пределах участка, который проектируется через щель. Следовательно, и при ортотрансформировании полностью устранить смещения точек за рельеф невозможно, но они в данном случае незначительные и ими можно пренебречь. Впервые эта идея была предложена французским инженером Р. Фербером в 1927 г. На практике он реализовал свою идею в 1933 г., разработав фотокартограф на базе двойного проектора. Этот прибор практического применения не получил, несмотря на то, что позволял получать трансформированные снимки удовлетворительного качества. И только четверть века спустя возросшие потребности создания карт заставили фотограмметристов вновь обратиться к идее ортофототрансформирования.

В 1954 г. в СССР сотрудники НИИ Топографической службы МО Е.И. Калантаров и Г.П. Жуков предложили, а затем разработали фототрансформатор щелевой ФТЩ, который успешно применялся при изготовлении ортофотоснимков [5].



В 1956 г. в США Рассел Бин запатентовал прибор ортофотоскоп в виде несложной приставки к двойному проектору, которую было предложено применять для ортофототрансформирования снимков. Ортофотоскоп претерпел ряд усовершенствований, пока не был создан ортофотоскоп (Келша). Только в этом приборе удалось устранить ряд недостатков, присущих первым моделям, и улучшить качество получаемых ортофотоснимков. Первые приборы для ортофототрансформирования, несмотря на различия в конструкции, реализовывали общий принцип ортофототрансформирования. Конструкция ФТЦ оказалась более удачной, благодаря введению ряда новшеств, которые позволили уже второй модели (ФТЦ-2) найти практическое применение [5].

Кроме ортофототрансформатора ФТЦ-2 в нашей стране были разработаны и другие ортофототрансформаторы. Например, к стереограммам СД и СЦ-1 Ф. В. Дробышев разработал ортофотоприставку ОФПД.

Принцип ортофототрансформирования лежал в основе и более поздних приборов, которые входили в состав аналитических фотограмметрических приборов и комплексов. В Советском Союзе для этой цели использовался ортофототрансформатор комплекса «Ортомат», который пришел в свое время на смену комплексу «Аналит» [6]. Подобные приборы были созданы в Германии, Франции, Швейцарии и других развитых странах.

С внедрением в фотограмметрическую обработку снимков цифровых технологий, стали применять, что естественно, и цифровое трансформирование снимков. Цифровое трансформирование предусматривает преобразование снимка попиксельно. Однако пиксел это не точка, он состоит из множества точек. Поэтому полное устранение смещений точек снимков технологически невозможно и при цифровом трансформировании.

Сущность цифрового трансформирования заключается в следующем. Представим, что аналоговый снимок разделили на множество мелких частей (квадратиков) (рис. 2). Только таких квадратиков много, а длина стороны квадратика составляет менее 10 мкм. Поэтому в каждом квадратике не будет видно изображений объектов, а будет своя оптическая плотность (яркость). Обозначим усредненную яркость каждого квадратика (пиксела) своим кодом (числом), а затем эти числа структурируем в виде матрицы размера  $D=[M \times N]$ . Именно в таком виде записывается цифровой снимок в памяти компьютера [7].

Для трансформирования цифрового снимка задают нулевую матрицу, т. е. каждый элемент ее равен нулю, или другими словами там нет никаких цифровых кодов. Это заготовка для трансформированного цифрового снимка. Задача состоит в том, чтобы каждому элементу присвоить яркость соответствующего элемента исходного снимка. Очевидно, что цифровой снимок должен быть привязан

к определенной системе координат, а присвоение яркости должно выполняться с учетом геометрии трансформируемого снимка. Если оставить за рамками эти вопросы, то ключевой задачей как раз будет перенос яркостей (обозначим их через  $d_{ij}$ ) с исходного снимка на заготовку для трансформированного снимка. Для решения этой задачи применяются два метода: прямое трансформирование и обратное трансформирование [8–9].

При прямом трансформировании, на основе зависимостей (1), по координатам  $x_{ij}, y_{ij}$  центра пиксела исходного снимка с яркостью  $d_{ij}$  находят координаты  $x_{ij}^0, y_{ij}^0$  на трансформированном снимке. Однако точка с этими координатами не будет совпадать с центром определенного квадратика (пиксела) трансформированного снимка. Следовательно, возникает неопределенность — какому элементу нулевой матрицы присвоить яркость  $d_{ij}$ ?

Обратное трансформирование предполагает определение координат  $x_{ij}, y_{ij}$  пиксела исходного (трансформируемого) снимка по координатам  $x_{ij}^0, y_{ij}^0$  трансформированного снимка. Для этого используют конкретные зависимости, обозначенные в общем виде через (1). Координаты  $x_{ij}, y_{ij}$  позволяют определить пиксел на исходном снимке, яркость которого следует присвоить пикселу трансформированного снимка. Здесь также возникает неоднозначность, так как значения координат  $x_{ij}, y_{ij}$  как и в первом случае, т. е. значения координат  $x_{ij}^0, y_{ij}^0$  получаются дробными. Проблема решается методом «ближайшего» соседа или интерполированием яркостей между соседними четырьмя пикселями. Обычно применяют билинейное интерполирование [10]. Преимуществом метода «ближайшего соседа» является выигрыш в производительности за счет сокращения



Рис. 2. Аналоговый снимок



времени на трансформирование снимка. Однако при этом ухудшается его качество.

Технология цифрового трансформирования реализуется программными комплексами современных цифровых фотограмметрических систем (ЦФС). Исходными данными при этом служат:

исходный (трансформируемый) снимок;

элементы внутреннего и внешнего ориентирования трансформируемого снимка;

цифровая модель рельефа (ЦМР).

Использование ЦМР предполагает, что при цифровом трансформировании устраняются не только смещения точек за наклон снимков, но и их смещения из-за рельефа местности. При этом могут применяться различные варианты использования информации о рельефе — как в виде ЦМР, так и информации о высоте средней плоскости. Последнее означает не что иное как трансформирование на одну плоскость, т.е. коллинеарное трансформирование. Но поскольку остальные варианты технологии цифрового трансформирования предполагают ортотрансформирование при различных вариантах формирования ЦМР, то для цифрового трансформирования в целом используют термин «ортотрансформирование». Следовательно, обычное трансформирование, которое применяется для цифрового трансформирования снимков равнинной местности, здесь по умолчанию является частным случаем цифрового ортотрансформирования.

Полученные при ортотрансформировании снимки используются для создания ортофотопланов. По существу этот процесс напоминает монтаж аналогового фотоплана, который обычно называют мозаичным фотопланом. Понятно, что «монтаж» в данном случае означает объединение файлов отдельных снимков в единый файл цифрового ортофотоплана по определенным правилам. Но так как между отдельными снимками могут иметь место тоновые или цветовые различия, то результат (ортофотоплан) иногда называют ортомозаикой. Впрочем, в программном обеспечении ЦФС предусмотрено выравнивание тона или цвета как между отдельными снимками ортофотоплана, так и коррекцию радиометрии всего ортофотоплана.

Здесь не ставилась задача подробно рассматривать варианты цифрового ортотрансформирования снимков, связанные с использованием различных систем координат и проекций, которые могут возникнуть, например, при трансформировании мелкомасштабных (космических) снимков на обширные территории. Были рассмотрены лишь принципиальные вопросы цифрового ортотрансформирования. Однако укажем на некоторые важные особенности цифрового ортотрансформирования.

Для цифрового ортотрансформирования необходимо иметь цифровую модель рельефа в виде цифровой матрицы высот, которая представляет собой регулярную сетку

квадратов на местности, стороны которых параллельны осям абсцисс и ординат используемой системы координат, с высотами в узлах сетки. Для ее формирования чаще всего используется ЦМР в виде триангуляции Делоне (TIN). Впрочем, для формирования цифровой матрицы высот могут использоваться и другие варианты, например, плановые координаты и высоты точек фототриангуляции. ЦМР может создаваться и картометрическим методом.

Если ЦМР создается в результате цифровой стереофотограмметрической обработки аэрокосмических снимков, то существенное значение приобретает способ определения и измерения одноименных (соответственных) точек перекрывающихся снимков. В настоящее время разработано достаточно способов решения этой задачи. Однако проблема состоит в том, чтобы определять соответственные точки в автоматическом режиме. В этом отношении самыми перспективными являются способы, которые стали развиваться, начиная с 80-х годов в компьютерном зрении для реконструкции сцены [11–18]. Но компьютерное зрение теоретически во многом пересекается с фотограмметрией. Поэтому в данном направлении есть резерв, особенно, что касается получения ортофотопланов в автоматическом режиме. Этому направлению в отечественной фотограмметрии уделялось недостаточно внимания. Если автоматически по снимкам будет создана ЦМР, то автоматическое создание ортофотоплана становится тривиальной технической задачей.

При цифровом ортотрансформировании крупномасштабных снимков с искусственными сооружениями, например, городских территорий, могут возникнуть определенные проблемы. В частности, могут появляться «мертвые» зоны. Они возникают на участках, закрытых высокими строениями. Кроме того, на снимках крыши высотных домов будут смещены, следовательно, смещения останутся и на ортофотопланах. Эта проблема решается созданием «истинного ортофото» (true orthophoto) [19]. На таком ортофотоплане устраняются не только смещения, причиной которых является рельеф, но и восстанавливается изображение «мертвых» зон с использованием изображений с перекрывающихся снимков. Для устранения смещения крыш недостаточно ЦМР, для этого необходимо иметь ЦМР, на которой должна быть подробная информация обо всех высотных объектах. Подобная модель носит название плотной цифровой модели поверхности (ЦМП) и для ее создания необходимо опознавать и определять высоты соответственных точек на расстояниях, соизмеримых с размером пиксела. В последние годы этим вопросам уделяется повышенное внимание, а самым эффективным методом идентификации одноименных точек для создания ЦМП перекрывающихся снимков признан полуглобальный метод, который первым предложил и разработал Хиршмюллер [20–21].

Вместе с тем следует отметить, что создание реального ортофото не всегда является актуальной и первоочередной задачей, к примеру, это относится к областям деятельности, для которых не нужны крупномасштабные ортофотопланы. Такой областью, например, является военное дело, так как для топогеодезического обеспечения необходима, как правило, геопространственная информация, отображающая местность в средних и мелких масштабах.

Подводя итог, отметим, что по фотопланам, как и по ортофотопланам, решаются одни и те же задачи. Они по свойствам, характеристикам и возможностям не должны отличаться друг от друга. Различия, еще раз подчеркнем, могут быть только в технологии получения трансформированных снимков. Эти различия имели место на этапах аналоговой и аналитической фотограмметрии, когда для трансформирования и ортофототрансформирования использовались различные приборы, как по устройству и по принципам работы, так и по технологии получения конечных результатов. Но и тогда, как и в наше время, когда приоритет принадлежит цифровому трансформированию снимков, не было и может быть смыслового различия между фотопланами и ортофотопланами. Поэтому оправданным и допустимым будет как одно, так и другое название. Однако для специалистов важным являются не пользовательские возможности, а видение перспектив развития методов и технологий создания ортофотопланов, которые должны двигаться в направлении повышения уровня автоматизации и оперативности получения конечной продукции.

## Литература

1. Урмаев Н. А. Теория гомографического преобразования и ее применение к математической картографии и созданию карт // Труды ЦНИИГАиК. 1956. Вып. 113. 75 с.
2. Урмаев Н. А. Элементы фотограмметрии. М.: Геодезиздат, 1941. 218 с.
3. Лобанов А. Н. Аналитическая фотограмметрия. М.: Недра, 1972. 224 с.
4. Александров П. С. Дифференциальное трансформирование с учетом масштабных и азимутальных искажений // Геодезия и картография. 1968. № 12. С. 31–37.
5. Александров П. С. Фотототрансформирование снимков // Итоги науки и техники. Серия «Геодезия и аэросъемка». 1978. № 13. 127 с.
6. Хруц Р. М. Этапы становления и развития фотограмметрии в России // Геодезия и картография. 2003. № 7. С. 50–58.
7. Хруц Р. М., Соловьев А. В. Зависимость точности построения фотограмметрической сети от геометрического разрешения цифровых снимков // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. 2013. № 641. С. 153–158.
8. Назаров А. С. Средства получения цифровых снимков и методы их обработки. Мн.: ТетраСистемс, 2009. 230 с.
9. Назаров А. С. Современные средства и методы получения и обработки цифровых снимков. Мн.: Учебный центр подготовки, повышения квалификации и переподготовки кадров землеустроительной и картографо-геодезической службы, 2009. 230 с.
10. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений: пер. с англ. / под редакцией Чочиа А. П. М.: Техносфера, 2005. 1072 с.
11. Longuet-Higgins H. C. A computer algorithm for reconstructing a scene from two projections // Nature. 1981. No. 293. Pp. 133–135. doi:10.1038/293133a0
12. Moravec H. Rover visual obstacle avoidance // Proceedings of the 7th international joint conference on Artificial intelligence (Vancouver, August 24–28, 1981). San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1981. Vol. 2 Pp. 785–790.
13. Foerstner W. A feature based correspondence algorithm for image matching // Int. Arch. of Photogrammetry and Remote Sensing. Rovaniemi, Finland, 1986. Vol. 26. No. 3. Pp. 150–166.
14. Foerstner W., Gulch E. A fast operator for detection and precise location of distinct points, corners and centres of circular features // ISPRS Intercommission Conf. on Fast Processing of Photogrammetric Data. Interlaken, 1987. Pp. 281–305.
15. Harris C. G., Stephens M. J. Combined Corner and Edge Detector // Proc. Fourth Alvey Vision Conf. Manchester, 1988. Pp. 147–151.
16. Heipke C. Automation of interior, relative and absolute orientation // International Archives of the Photogrammetry and Remote Sensing (Vienna, July 9–19, 1996). Vienna, 1996. Vol. XXXI. Pt. B3 III. Pp. 297–311.
17. Hartley R. I. Theory and practice of projective rectification // International Journal of Computer Vision. 1999. No. 35 (2). Pp. 115–127.
18. Hartley R. I., Zisserman A. Multiple View Geometry in Computer Vision. 2nd Edition. Cambridge University Press, 2003. 672 p.
15. Блохинов Ю. Б. Автоматизация взаимного ориентирования цифровых снимков на основе алгоритмов машинного зрения // Известия РАН. Теория и системы управления. 2010. № 6. С. 152–163.
19. Hirschmuller H. Accurate and efficient stereo processing by semi-global matching and mutual information // IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (San Diego, June 20–26, 2005). San Diego, 2005. No. 2. Pp. 807–814.
21. Hirschmuller H., Schrstein D. Evaluation of stereo matching costs on images with radiometrics differences // Trans. On Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2009. No. 31 (9). Pp. 1582–1599.

## AIRPLANS (ORTHOPHOTOMAPS): ESSENCE, CONTENT AND THE DEVELOPMENT OF METHODS, WAYS AND MEANS OF PHOTO TRANSFORMATION

**ROMAN M. KHRUSH,**

St. Petersburg, Russia, chrusch@rambler.ru

**KEYWORDS:** airplan; orthophotomap; digital transformation; direct transformation; back transformation.

### ABSTRACT

The principal questions of airplans and orthophotomaps essence and content are considered. It's proved, there is no useful distinction between airplans and orthophotomaps. Airplans are taken at the flat topography and orthophotomaps - at the mountain topography. They must have uniform standards by their custom properties. Different names are the result of photo transformation ways and technologies, which are particularly apparent during the analog and analytical photogrammetry development. The theoretical base of aerospace photos transformation is explored. It's shown that there should be the point accordance between the transformed photos and the source ones, based on the main dependence for the single-image. The differences in flat and mountain topographies photo transformation are disappeared due to digital technologies implementation to the photogrammetric picture processing with unified method adopted. As the result the digital transformation became the particular case of orthotransformation. Digital transformation can be done by two methods: the direct and the back transformation. As a rule, the back digital transformation is applied. The transfer of optical density (brightness) from the source photo to the null matrix of transforming picture is the main thing. The work stressed that nowadays the study aims at the automate system of making digital orthophotomaps. The key moment is an automatic identification and modification of the same name points for making a digital terrain model. If it has been achieved the automatic making of digital airplan becomes the trivial technical task. That's why the studies in this field are both relevant and forward-looking.

### REFERENCES

1. Urmaev N.A. Teorija gomograficheskogo preobrazovanija i ee primenenie k matematicheskoj kartografii i sozdaniju kart [The theory of gomograficheskij transformation and its application to mathematical cartography and creation of cards]. *Trudy Tsentral'nogo nauchno-issledovatel'skogo instituta geodezii, aeros"emki i kartografii* [Proceedings of the Central research Institute of geodesy, aerial photography and cartography]. 1956. No. 113. 75 p. (In Russian)
2. Urmayev N.A. *Elementy fotogrammetrii* [Elements of photogrammetry]. Moscow: Geodesic, 1941. 218 p. (In Russian)
3. Lobanov A.N. *Analiticheskaya fotogrammetriya* [Analytical photogrammetry]. Moscow: Nedra, 1972. 224 p. (In Russian)
4. Aleksandrov P.S. Differentsial'noe transformirovanie s uchedom masshtabnykh i azimutal'nykh iskazheniy [Differential transformation taking into account the scale and azimuthal distortions]. *Geodeziya i kartografiya* [Geodesy and cartography]. 1968. No. 12. Pp. 31-37. (In Russian)
5. Aleksandrov P.S. Fototransformirovanie snimkov [Phototransformation of images]. *Itogi nauki i tekhniki. VINITI A.N. SSSR. Seriya «Geodeziya i aeros"emka»* [Results of science and technology. Series of "Geodesy and aerial survey"]. 1978. No. 13. Pp.127 p. (In Russian)
6. Khrushch R.M. *Etapy stanovleniya i razvitiya fotogrammetrii v Rossii* [Stages of the formation and development of photogrammetry in Russia]. *Geodeziya i kartografiya* [Geodesy and cartography]. 2003. No. 7. Pp. 50-58. (In Russian)
7. Khrushch R.M., Solov'ev A.V. Zavisimost' tochnosti postroeniya fotogrammetricheskoy seti ot geometricheskogo razresheniya tsifrovyykh snimkov [Dependence of accuracy of creation of photogrammetric network on geometrical permission of digital pictures]. *Trudy VoЕННО-kosmicheskoy akademii imeni A. F. Mozhayskogo* [Military Space academy named after A.F. Mozhaisky]. 2013. No. 641. Pp. 153-158. (In Russian)
8. Nazarov A.S. *Sredstva polucheniya tsifrovyykh snimkov i metody ikh obrabotki* [Means of obtaining digital pictures and methods of their processing]. Minsk: TetraSistems, 2009. 230 p. (In Russian)
9. Nazarov A.S. *Sovremennye sredstva i metody polucheniya i obrabotki cifrovyykh snimkov* [Modern means and methods of receiving and processing of digital pictures]. Minsk: Uchebnyj centr podgotovki, povysheniya kvalifikacii i perepodgotovki kadrov zemleustroitel'noj i kartografo-geodezicheskoy sluzhby, 2009. 230 p. (In Russian)
10. Gonzales R.C., Woods R.E. *Digital image processing*. Boston: MA Addison-Wesley, 2001. 823 p.



11. Longuet-Higgins H.C. A computer algorithm for reconstructing a scene from two projections. *Nature*. 1981. No. 293. Pp. 133-135. doi:10.1038/293133a0
12. Moravec H. Rover visual obstacle avoidance. Proceedings of the 7th international joint conference on Artificial intelligence (Vancouver, August 24-28, 1981). San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1981. Vol. 2 Pp. 785-790.
13. Foerstner W. A feature based correspondence algorithm for image matching. *Int. Arch. of Photogrammetry and Remote Sensing*. 1986. Vol. 26. No. 3. Pp. 150-166.
14. Foerstner W., Gulch E. A fast operator for detection and precise location of distinct points, corners and centres of circular features. ISPRS Intercommission Conf. on Fast Processing of Photogrammetric Data. Interlaken, 1987. Pp. 281-305.
15. Harris C.G. Stephens M.J. Combined Corner and Edge Detector. Proc. Fourth Alvey Vision Conf. Manchester, 1988. Pp. 147-151.
16. Heipke C. Automation of interior, relative and absolute orientation. International Archives of the Photogrammetry and Remote Sensing (Vienna, July 9-19, 1996). Vienna, 1996. Vol. XXXI. Pt. B3 III. Pp. 297-311.
17. Hartley R.I. Theory and practice of projective rectification. *International Journal of Computer Vision*. 1999. No. 35 (2). Pp. 115-127.
18. Hartley R.I., Zisserman A. *Multiple View Geometry in Computer Vision*. 2nd edition. Cambridge University Press, 2003. 672 p.
19. Blokhinov Yu.B. Automation of mutual orientation of digital pictures on the basis of algorithms of machine sight. *Izvestiya Akademii Nauk. Teoriya i Sistemy Upravleniya* [Journal of Computer and Systems Sciences International]. 2010. No. 6. Pp. 152-163. (In Russian)
20. Hirschmuller H. Accurate and efficient stereo processing by semi-global matching and mutual information. *IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition* (San Diego, June 20-26, 2005). San Diego, 2005. No. 2. Pp. 807-814.
21. Hirschmuller H. Schrstein D. Evaluation of stereo matching costs on images with radiometrics differences. *Trans. On Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2009. No. 31 (9). Pp. 1582-1599.

**INFORMATION ABOUT AUTHOR:**

Khrush R.M., PhD, Docent, Associate Professor of Phototopography and Photogrammetry of the Military-Space Academy.

---

**For citation:** Khrush R.M. Airplans (orthophotomaps) essence, content and the development of methods, ways and means of photo transformation. *H&ES Research*. 2018. Vol. 10. No. 3. Pp. 94-102. doi: 10.24411/2409-5419-2018-10079 (In Russian)





# КРУПНЕЙШИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ВУЗ ВС РФ ВОЕННО-КОСМИЧЕСКАЯ АКАДЕМИЯ ИМЕНИ А.Ф.МОЖАЙСКОГО



ОБУЧЕНИЕ В  
САНКТ-ПЕТЕРБУРГЕ



ВЫСОКИЙ СОЦИАЛЬНЫЙ  
СТАТУС



ОГРОМНЫЙ ВЫБОР  
СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ



ВЫСОКОПЛАЧИВАЕМАЯ  
РАБОТА



ПОВЫШЕННАЯ  
СТИПЕНДИЯ



ОБЕСПЕЧЕНИЕ  
ПИТАНИЕМ И  
ФОРМЕННОЙ  
ОДЕЖДОЙ



ПРОЖИВАНИЕ В  
ОБЩЕЖИТИИ



ПРЕСТИЖНЫЕ  
ПРОФЕССИИ  
БУДУЩЕГО



ГАРАНТИРОВАННОЕ  
ТРУДОУСТРОЙСТВО



ВОСТРЕБОВАННОСТЬ В  
ВООРУЖЕННЫХ  
СИЛАХ РФ



РОМАНТИКА  
ВОЕННОЙ СЛУЖБЫ



БЕСКОНЕЧНЫЕ  
ВОЗМОЖНОСТИ  
КАРЬЕРНОГО РОСТА И  
СОЦИАЛЬНЫЙ ЛИФТ

## ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ ПОСТУПАЮЩИХ

Почтовый адрес: 197198, г. Санкт-Петербург,  
ул. Ждановская, д. 13.

Телефоны приемной комиссии: (812) 347-96-59, 347-97-70.

Факс: (812) 237-12-49.

Сайт: [www.mil.ru](http://www.mil.ru), [www.academy-mozhayskogo.ru](http://www.academy-mozhayskogo.ru)

Адрес электронной почты: [spb.vka@yandex.ru](mailto:spb.vka@yandex.ru).



## ТРЕБОВАНИЯ К ПРЕДСТАВЛЕНИЮ МАТЕРИАЛОВ

Редакция журнала H&ES Research принимает к публикации статьи на русском и английском языках. Предоставляемая рукопись должна быть актуальной, обладать новизной, отражать постановку задачи, содержать описание основных результатов исследования, выводы, а также соответствовать указанным ниже правилам оформления. Текст должен быть тщательно вычитан автором, который несет ответственность за научнотеоретический уровень публикуемого материала.

Статья предоставляется в электронном виде, единым файлом, имеющим следующую структуру: заглавие статьи, сведения об авторах, аннотация, ключевые слова, текст статьи (включая иллюстрации, таблицы и формулы), пристатейный список литературы, англоязычный блок. Также представляется отдельная папка с экспортированными изображениями рисунков в формате TIFF, EPS по требованиям указанным в п.7.

К статье прилагается экспертное заключение о возможности опубликования статьи в открытой печати и две рецензии кандидатов или докторов наук по профилю планируемой публикации материалов (сканированные копии в электронном виде).

Все материалы высылаются электронной почтой в адрес журнала: HT-ESResearch@yandex.ru.

1. **Статья подготавливается** в редакторе MS Word. Шаблон статьи можно скачать на сайте журнала [www.h-es.ru](http://www.h-es.ru).

2. **Данные об авторе:** фамилия, имя, отчество, ученая степень, звание, должность и полное название организации – места работы, город, страна, адрес электронной почты и почтовый адрес каждого автора полностью.

3. **Объем аннотации** 200-250 слов. Аннотация должна быть информативной (не содержать общих слов), без сокращений, структурированной, отражать основное содержание статьи: предмет, цель, методологию проведения исследований, результаты исследований, область их применения, выводы. Приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. Выводы могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, гипотезами, описанными в статье. Предложения должны начинаться словами: показано, получено, исследовано, предсказано и т.д. и т.п.

4. **Ключевые слова:** от 5 до 7 слов (словосочетаний), разделенных точкой с запятой.

5. **Объем статьи** без аннотации – от 15 до 30 тыс. знаков с пробелами. Рисунки и таблицы в объеме статьи не учитываются.

6. **Формульные выражения** выполняются в редакторе Math Type. Формулы нумеруются в круглых скобках, источники – в прямых. Нумерация формул и приведение в списке источников, на которые нет ссылок по тексту, не допускается. Длина формулы в одну строчку 8-9 см.

Простые формулы и буквенные обозначения величин следует писать в строку обычным текстом. В формулах использовать только буквы латинского и греческого алфавита!

Размеры шрифтов (Size) предварительно перед набором первой формулы установить (в MathType) следующие: кегль основной – 10, крупный индекс – 7, мелкий индекс – 5, крупный символ – 12, мелкий символ – 8. Формулы, не содержащие специальных математических символов, должны быть набраны в тексте (в формате Word). Греческие обозначения, скобки (квадратные и круглые) и цифры всегда набираются прямым шрифтом. Латинские буквы набираются курсивом

как в формулах, так и в тексте, кроме устойчивых форм (max, min, cos, sin, tg, log, exp, det ...).

**Нельзя использовать сканированные формулы! Все формулы должны быть набраны вручную!**

7. **Рисунки и таблицы** в статье должны быть пронумерованы и снабжены подписями, в тексте статьи должны иметься ссылки на каждый рисунок и таблицу (рис.1 и табл.1). Если рисунок или таблица единственные в статье, то их не нумеруют.

Рисунки должны быть четкими, с хорошо проработанными деталями. Избегать текстовых надписей на иллюстрациях. Заменять их цифровыми обозначениями, которые поясняются в подписи или в основном тексте. Все рисунки прилагаются в виде отдельных файлов в формате TIFF, EPS с разрешением не менее 300 dpi для оригинального размера в печатном издании (для больших рисунков ширина от 14 до 20 см, для маленьких от 7 до 9 см).

8. **Список литературы:** от 15 до 50 наименований. Из них самоцитирований не должно быть более 25%. В числе источников желательно не менее 50 % иностранных источников (для статей на английском языке – 15% российских). Состав источников должен быть актуальным и содержать не менее 8 статей из научных журналов не старше 10 лет, из них 4 – не старше 3 лет.

Ссылки должны быть только на статьи, патенты, книги и статьи из сборников трудов. В списках литературы не размещать ГОСТы, рекомендации, диссертации, авторефераты и другую нормативную и непериодическую документацию. Эти данные можно указывать в теле статьи в скобках или в виде постраничных сносок (если автор непременно хочет указать нормативный документ или сослаться на свою диссертацию). Список литературы оформляется в соответствии с ГОСТ 7.052008. **Образец оформления списка литературы размещен на сайте журнала [www.h-es.ru](http://www.h-es.ru).**

9. **На английском языке** предоставляется: название статьи, фамилия, имя, отчество, информация об авторах (должность, ученая степень, ученое звание, место работы), город, страна и электронный адрес всех авторов полностью, аннотация, ключевые слова и списки литературы.

Все названия издательств и журналов должны быть транслитерированы, а не переведены. Названия организаций в списках литературы (Труды Академии...) должны быть четко выверены с данными организации и иметь официальное английское наименование, которое указано на их сайте или также транслитерированы. Образец оформления списка литературы размещен на сайте журнала [www.h-es.ru](http://www.h-es.ru).

### 10. Структура статьи на английском языке

Introduction (введение)

Materials and methods (материалы и методы).

Results and Discussions (результаты и обсуждение).

Conclusions (вывод)

Acknowledgements (благодарности, необязательный раздел)

References (ссылки на использованную литературу)

**На русском языке** предоставляется: название статьи, фамилия, имя, отчество, информация об авторах (должность, ученая степень, ученое звание, место работы), город, страна и электронный адрес всех авторов полностью, аннотация, ключевые слова и списки литературы.

**Внимание! Редакция оставляет за собой право отклонить представленные материалы, оформленные не по указанным правилам.**